

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**Г. Г. ЖЕМЕРОВ**  
**Д. В. ТУГАЙ**

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ**  
**ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ**  
**ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

**МОНОГРАФІЯ**

**Харків – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова – 2018**

УДК 620.9-049.34:621.311  
Ж53

**Автори:**

**Жемеров Георгій Георгійович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислової і біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

**Тугай Дмитро Васильович**, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

**Рецензенти:**

**Кузнецов Б. І.**, доктор технічних наук, професор, завідувач відділом проблем управління магнітним полем Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України»;

**Міхальський В. М.**, доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України, головний науковий співробітник відділу перетворення та стабілізації електромагнітних процесів № 1 Інституту електродинаміки НАН України

*Рекомендовано до друку вченою радою ХНУМГ ім. О. М. Бекетова,  
протокол № 5 від 28.12.2017.*

**Жемеров Г. Г.**

Ж53 Енергоефективність систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії : монографія / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 272 с.

ISBN 978-966-695-454-4

У монографії розглянуто питання підвищення енергоефективності трифазних систем електропостачання засобами силової електроніки: шляхом використання паралельного силового активного фільтра й енергоємного накопичувача енергії. Запропоновано концепцію мінімізації втрат у трифазних системах електропостачання, розвинуто засади сучасної теорії активної і реактивної потужності, уперше отримано розрахункове співвідношення й запропоновано систему складових сумарної потужності втрат, кожна з яких відповідає особливостям електромагнітних процесів у трифазній системі електропостачання.

Рекомендовано для фахівців і науковців, які працюють у галузі електроенергетики та силової електроніки, а також викладачам вищих навчальних закладів, аспірантам і студентам, які досліджують питання підвищення енергоефективності систем електропостачання.

УДК 620.9-049.34:621.311

ISBN 978-966-695-454-4

© Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай, 2018  
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ СИСТЕМ	
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	11
1.1 Зменшення втрат енергії в системі електропостачання.....	11
1.1.1 Компенсація реактивної потужності й пульсацій	
миттєвої активної потужності.....	13
1.1.2 Використання енергоємних накопичувачів енергії.....	16
1.1.3 Модернізація системи електропостачання комунальних	
споживачів енергії.....	18
1.2 ККД систем електропостачання постійної напруги й	
трифазної симетричною системи синусоїдальних	
напруг.....	23
1.2.1 Система електропостачання постійної напруги.....	24
1.2.2 Трифазна симетрична система електропостачання	
синусоїдальних напруг з активним навантаженням.....	31
1.2.3 Перевірка співвідношень, отриманих для СЕ постійної	
напруги.....	33
1.2.4 Перевірка співвідношень для трифазної симетричної	
системи електропостачання.....	35
1.2.5 Розрахування ККД системи електропостачання з	
активним компенсатором.....	37
1.3 Коефіцієнт корисної дії системи електропостачання	
однофазної змінної напруги прямокутної й синусоїдальної	
форм.....	39
1.3.1 Система електропостачання однофазної змінної	
напруги прямокутної форми.....	40
1.3.2 Система електропостачання однофазної синусоїдальної	
напруги.....	43
1.3.3 Система електропостачання синусоїдальної напруги в	
режимі максимально можливого ККД.....	47
1.3.4 Співставлення ККД трифазної і однофазної систем	
електропостачання.....	51
1.3.5 Перевірка співвідношень, отриманих для однофазної	
СЕ з прямокутною змінною напругою джерела.....	53

1.4 Коефіцієнт корисної дії трифазної чотирипровідної системи електропостачання з асиметричним навантаженням.....	56
1.4.1 Еквівалентна схема трифазної СЕ.....	56
1.4.2 Трифазна система електропостачання з симетричним навантаженням.....	58
1.4.3 Трифазна СЕ з асиметричним навантаженням.....	61
1.4.4 Перевірка теоретичних результатів.....	64
Висновки за розділом 1.....	68
 РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ЕФЕКТУ В ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	
2.1 Перетворення систем координат у силовій електроніці й електроприводі.....	71
2.2 Теорема про мінімум втрат енергії в трифазних системах електропостачання.....	77
2.2.1 Еквівалентна схема трифазної чотирипровідної системи електропостачання з силовим активним фільтром.....	78
2.2.2 Причини виникнення додаткових втрат енергії в системах електропостачання.....	80
2.2.3 Максимально можливий коефіцієнт корисної дії трифазної системах електропостачання .....	82
2.2.4 Формулювання теореми про мінімум втрат енергії в трифазних системах електропостачання.....	87
2.3 Енергозберігаючий ефект компенсації пульсацій миттєвої активної потужності.....	87
2.3.1 Одна пульсація активної потужності.....	89
2.3.2 Накладення двох пульсацій активної потужності.....	90
2.3.3 Накладення трьох пульсацій активної потужності.....	94
2.4 Взаємозв'язок модуля миттєвої реактивної потужності із коефіцієнтом корисної дії системи електропостачання.....	97
2.4.1 Миттєві активна й реактивна потужності в системі електропостачання.....	98
2.4.2 Основні характеристики системи електропостачання...	100
2.4.3 Коефіцієнт потужності і ККД системи електропостачання.....	104

2.5 Енергоефективність корекції фази струму з одночасною компенсацією пульсацій активної та реактивної потужностей у трифазних системах електропостачання.....	106
Висновки за розділом 2.....	113
РОЗДІЛ 3 РОЗВИТОК СУЧАСНОЇ ТЕОРІЇ МИТТЄВИХ АКТИВНОЇ І РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТЕЙ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ СУМАРНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВТРАТ І ЇЇ СКЛАДОВИХ В ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	
3.1 Енергія і потужність в системах розподіленого електропостачання.....	116
3.1.1 Базові характеристики систем електропостачання.....	118
3.1.2 Потужність резистивного короткого замикання.....	121
3.1.3 Розрахування коефіцієнта корисної дії системи електропостачання.....	123
3.1.4 Максимальний і реальний коефіцієнти корисної дії.....	126
3.1.5 Обмін енергією, миттєві активна й реактивна потужності.....	127
3.2 Фізичний зміст поняття «реактивна потужність» стосовно трифазних систем електропостачання з нелінійним навантаженням.....	131
3.2.1 Відповіді на попередні питання, що уможливають формулювання визначення терміна «реактивна потужність».....	133
3.2.2 Обґрунтування прийнятих припущень щодо визначення фізичного змісту поняття «реактивна потужність».....	136
3.2.3 Визначення реактивної потужності.....	138
3.3 Складові сумарної потужності втрат у трифазних системах електропостачання.....	139
3.3.1 Потужність втрат і реактивна потужність у трифазних системах електропостачання при симетричних синусоїдальних напругах джерела.....	139
3.3.2 Залежність додаткових втрат у трифазних системах електропостачання від пульсування миттєвої активної потужності.....	145

3.3.3 Складові сумарної потужності втрат у трифазній чотирипровідній системі електропостачання при симетричних синусоїдальних напругах джерела.....	146
3.3.4 Уточнення співвідношення для визначення сумарної потужності втрат у трифазній системі електропостачання.....	148
3.4 Складові сумарної потужності втрат у просторових рqr-координатах.....	154
3.4.1 Складові сумарної потужності втрат у просторових рqr-координатах при симетричних синусоїдальних напругах джерела.....	154
3.4.2 Складові сумарної потужності втрат у просторових рqr-координатах при несиметричних напругах джерела.....	159
3.4.3 Поширення результатів на наявні методи розрахування складових потужності втрат.....	162
Висновки за розділом 3.....	163

## РОЗДІЛ 4 ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ

### ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З

### НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ І

### ЕНЕРГОЄМНИМИ НАКОПИЧУВАЧАМИ

### ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ..... 166

4.1 Порівняння систем електропостачання рухомого складу метрополітену за їхньою енергоефективністю.....	166
4.1.1 Миттєва потужність мережі в інтервалі переміщення рухомого складу.....	167
4.1.2 Розрахування показників ефективності систем електропостачання.....	171
4.2 Енергозберігаючий ефект в Smart Grid – системах електропостачання з магістральною схемою підімкненням споживачів.....	177
Висновки за розділом 4.....	182

## РОЗДІЛ 5 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА

### ПЕРЕВІРКА ОТРИМАНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ

### ПОЛОЖЕНЬ..... 184

5.1 Комп'ютерна модель для перевірки енергозберігаючого ефекту від компенсації пульсацій активної та реактивної потужностей і корекції фази струму.....	184
---	-----

5.2 Математична модель трифазної системи електропостачання з силовим активним фільтром для оцінювання складових сумарної потужності втрат.....	191
5.2.1 Структура моделі трифазної системи електропостачання.....	192
5.2.2 Виконання умови $P_{usf} = \text{const}$ під час моделювання трифазної системи електропостачання.....	196
5.2.3 Matlab-модель трифазної системи електропостачання...	204
5.3 Перевірка розрахування складових сумарної потужності втрат.....	208
5.3.1 Моделювання симетричних трифазних систем електропостачання.....	208
5.3.2 Перевірка розрахункового співвідношення, що обумовлює залежність додаткових втрат від реактивної потужності й пульсацій миттєвої активної потужності.....	211
5.3.3 Перевірка наближеного співвідношення для розрахування сумарної потужності втрат як суми чотирьох складових.....	213
5.3.4 Перевірка переходу від реактивної потужності до потужності втрат у трифазних системах електропостачання.....	218
5.3.5 Перевірка уточненого співвідношення для розрахування сумарної потужності втрат як суми п'яти складових.....	222
5.3.6 Резерв підвищення коефіцієнта корисної дії трифазної системи електропостачання при підімкненні силового активного фільтра. Розрахування складових потужності втрат у двох системах.....	223
5.4 Моделювання систем електропостачання рухомого складу метрополітену.....	224
5.5 Верифікація розрахування елементів і якісних показників роботи системи електропостачання з паралельним силовим активним фільтром.....	231
Висновки за розділом 5.....	237
ВИСНОВКИ.....	239
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	242
ДОДАТКИ.....	255

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АІН – автономний інвертор напруги

АВ – активний випрямляч

АВДН – активний випрямляч – джерело напруги

АІС – автономний інвертор струму

АІС – автономний інвертор струму з відсікаючими діодами

АКБ – акумуляторна батарея

КЗ – коротке замикання

ККД – коефіцієнт корисної дії

МП – метрополітен

НЕ – накопичувач енергії

НП – напівпровідниковий перетворювач

САФ – силовий активний фільтр

СЕ – система електропостачання

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ШПІ – широтно-імпульсний перетворювач

SG – інтелектуальна мережа

THD – total harmonic distortion

\* – відносна величина



## ВСТУП

Рациональне використання енергетичних ресурсів, за умови зростання потреб людства щодо їхнього споживання, стає одним з ключових завдань, вирішення якого є запорукою сталого розвитку цивілізації. Універсальний і найспоживаніший різновид енергії, що набув поширення в технологічних установках, – електрична енергія. Бурхливий розвиток технологій, що став наслідком технічної революції XX століття, призвів до того, що електроенергія стала доступним ресурсом задоволення як промислових, так і побутових потреб різноманітних споживачів. Збільшення споживання електричної енергії поглибило проблему ресурсозбереження й спонукало дослідників до пошуку шляхів її економії. Одним зі значущих резервів економії електроенергії є зменшення її втрат під час генерації, перетворення, транспортування, розподілення й кінцевого споживання. Якщо враховувати недосконалість технології використання ефекту надпровідності, що спостерігається на сучасному етапі, то найефективнішим засобом зменшення втрат енергії в системі електропостачання можна вважати використання енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів і енергоємних накопичувачів енергії. Напівпровідникові перетворювачі, виконані на потужних швидкодіючих керованих ключах, забезпечують отримання якісних енергетичних характеристик процесу електроспоживання в широкому діапазоні змінювання параметрів як навантаження, так і мережі живлення.

Системоутворювальні функції напівпровідникових перетворювачів передбачають підвищення вимог до надійності їхньої роботи, якості електричної енергії на вході й виході та енергетичної ефективності. Остання вимога стає вирішальною в разі промислового впровадження напівпровідникових перетворювачів в системі електропостачання (далі – СЕ), оскільки якщо після виконання перших двох вимог коефіцієнт корисної дії системи електропостачання зменшується порівняно з традиційними підходами, то впровадження системних змін втрачає сенс. Чинні стандарти, що нормують показники якості електричної енергії і обумовлюють електромагнітну сумісність електротехнічного обладнання й промислової мережі, висувають досить жорсткі вимоги щодо впливу нелінійних споживачів на характеристики мережі. Беручи до уваги вимоги стандартів, можна стверджувати, що вирішення проблеми електромагнітної сумісності стає одним із першочергових завдань, які потрапляють в поле зору багатьох дослідників. Із огляду на об'єктивні

причини питання енергетичної ефективності не жорстко регламентуються стандартами, хоча є ключовими для багатьох національних програм розвитку енергетичної галузі й економіки загалом. Вирішення цих питань у системах електропостачання з нелінійними навантаженнями спричинено вирішенням питань електромагнітної сумісності.

Другорядність проблеми енергоефективності обумовило брак методів для її вирішення. Наявні методи розрахування втрат енергії в системах електропостачання зазвичай не пов'язані зі способами управління напівпровідниковими перетворювачами, що здатні зменшити ці втрати. Показовим є використання силового активного фільтра (далі – САФ) для поліпшення показників якості електроенергії в разі живлення нелінійного навантаження від трифазної чотирипровідної СЕ. Використання САФ забезпечує поліпшення спектрального складу мережевого струму, компенсування реактивної потужності, вирівнювання пофазної асиметрії струмів та компенсування струму нульового проводу. За наявності в ланці постійного струму САФ накопичувача енергії відповідної ємності можна вирівняти графік навантаження в інтервалах часу, обумовлених змінами в технологічному процесі впродовж доби. Зазначені заходи дають змогу зменшити втрати електроенергії в трифазній СЕ і, якщо ці втрати є меншими за втрати в самому компенсаторі, визначити економічний ефект від використання САФ.

Наявні стратегії й способи управління САФ обумовлені положеннями сучасних теорій активної й реактивної потужностей, що оперують з узагальненими просторовими векторами напруг і струмів трифазної системи [92; 93; 103; 110; 112; 113; 116; 118; 119; 122]. Використання цих теорій ніколи не пов'язувалось із визначенням показників енергетичної ефективності. Це відкриває певний простір для подальших досліджень із можливим розповсюдженням їхніх результатів на системи електропостачання, зокрема з двонаправленим енергетичним потоком.

З огляду на зазначені причини розвиток сучасних теорій потужності для енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів, що використовуються в системах електропостачання, є важливою науково-прикладною проблемою, вирішенню якої присвячена монографія.

## **РОЗДІЛ 1 КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

### **1.1 Зменшення втрат енергії в системі електропостачання**

Розвиток енергетики й електротехніки як галузі світового народного господарства пов'язують із винайденням у кінці XIX століття електричної лампи розжарювання (Томас Едісон), трансформатора (Люсьєн Голар, Джон Гібс), багатофазної машини змінного струму (Нікола Тесла, Михайло Доліво-Добровольський), а також підприємницькою ініціативою Джорджа Вестінгауза. Понад 125 років тому було закладено основні принципи побудови систем електропостачання, а саме: використання трифазних мереж змінного струму для передачі електроенергії; централізоване виробництво електроенергії на потужних електростанціях; синхронна робота генераторів електростанцій, об'єднаних в єдину енергосистему; односпрямований потік енергії в системі електропостачання – від електростанцій до споживачів і централізоване управління потоками енергії.

Ці принципи використовуються і в наш час. Стабільність п'яти зазначених принципів розвитку енергетики пояснюється тим, що відмова від будь-якого з них приводить не тільки до необхідності заміни енергетичного й електротехнічного обладнання, а й до значних змін у ринкових відносинах виробників, постачальників і споживачів електроенергії.

В останнє десятиліття (значною мірою внаслідок впливу принципів функціонування мережі інтернет) виникла нова концепція розвитку мереж електропостачання, що отримала назву Smart Grid [56; 99; 106; 115]. Перспектива практично реалізувати концепцію Smart Grid з'явилася як наслідок досягнень альтернативної енергетики й силової електроніки, прогресу в розробленні енергоємних накопичувачів енергії; початку широкомасштабного промислового виробництва електромобілів, розвитку теорії й технології управління складними енергосистемами [1; 5; 17; 18; 57; 77; 81; 82; 86; 87; 88; 125].

Різновидами Smart Grid – систем електропостачання є Smart House, Smart Building, Smart Enterprise, Smart City, Smart Country тощо. Вони базуються на загальних принципах, що докорінно відрізняються від п'яти принципів побудови наявних на сьогодні СЕ: розподілена асинхронна система електропостачання з двонаправленими потоками електроенергії і з

можливістю підімкнення джерел електроенергії за принципом plug and play у будь-який момент часу; інтелектуальне управління СЕ з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, вимірювальних приладів і комунікаційної інфраструктури; можливість роботи в автономному щодо основної промислової мережі режимі, зокрема при 100 % споживання енергії від альтернативних джерел; зменшення втрат електроенергії під час її генерування, транспортування й споживання; високий рівень якості електроенергії в СЕ, її стабільність і надійність; відповідність СЕ екологічним вимогам.

Видається очевидним, що умовою успіху практичної реалізації концепції Smart Grid є значне загальне зменшення втрат електроенергії під час її виробництва, транспортування та споживання, що досягається внаслідок упровадження Smart Grid. Ця умова поширюється і на поліпшення якості електроенергії: змінювання структури СЕ, що призводить до поліпшення якісних показників електроенергії, має одночасно спричиняти й зменшення втрат енергії. Якщо реалізація Smart Grid буде призводити до збільшення втрат енергії, то такий негативний ефект може виявитися вагомішим за позитивні фактори нової концепції.

Сучасний рівень розвитку силової електроніки уможливорює створення нових типів перетворювальних пристроїв з будь-якими необхідними характеристиками. Перетворювальні системи повинні забезпечувати дві основні вимоги: високий (близький до одиниці) коефіцієнт корисної дії у всьому діапазоні змінювання параметрів навантаження та низький (наближений до нуля) коефіцієнт нелінійних спотворень (THD) напруг і струмів у точках підімкнення перетворювача до джерела електроенергії й навантаження.

Параметри й характеристики силових напівпровідникових приладів, трансформаторів, реакторів, конденсаторів і інших елементів перетворювальних систем досягли на сьогодні рівня, за якого коефіцієнт корисної дії перетворювачів середньої і великої потужності, виготовлених із використанням цих елементів, у номінальному режимі перебуває в межах 0,95–0,98.

Подальше підвищення ККД унаслідок удосконалення параметрів елементів силових схем обмежене. Найбільш очікуваний прогрес у боротьбі за енергоефективність перетворювачів пов'язаний з освоєнням виробництва силових напівпровідникових приладів на основі карбіду кремнію (CSi) [4; 68; 78] або іншого напівпровідника, проте це уможливить зменшення втрат у високовольтних перетворювачах не більше

ніж на 1–1,5 %. Приблизно на таке саме значення варто очікувати збільшення втрат у додаткових фільтрокомпенсуючих пристроях, необхідних для задоволення підвищених вимог щодо якісних показників електроенергії.

Інша вимога щодо пристроїв силової електроніки в Smart Grid пов'язана зі схемною оборотністю напівпровідникових перетворювачів, що дає змогу забезпечити двобічність енергетичного потоку, а також можливість виконання цими перетворювачами різноманітних функцій залежно від системних потреб, спричинених змінюванням конфігурації.

Істотне зменшення втрат енергії в наявних і нових інтелектуальних системах електропостачання можна досягти трьома способами:

1) широким застосуванням порівняно нових перетворювачів силової електроніки, таких як активні випрямлячі, силові активні фільтри, і на їхній основі – компенсаторів миттєвої реактивної потужності та пульсацій миттєвої активної потужності [13; 46; 47; 54; 79];

2) використанням енергоємних накопичувачів енергії, виготовлених на основі суперконденсаторів і акумуляторів [30; 33; 37];

3) радикальним змінюванням системи електропостачання комунальних споживачів, що полягає в переході від однофазних мереж і споживачів до трифазних [21; 102].

Розглянемо зазначені шляхи зменшення втрат електроенергії докладніше.

#### 1.1.1 Компенсація реактивної потужності й пульсацій миттєвої активної потужності

Залежність розрахункового модуля вектора реактивної потужності від потужності втрат енергії в системі електропостачання оцінено в роботі [47]. У роботах [46; 47] наведено залежності ККД системи електропостачання від відносної амплітуди пульсацій миттєвої активної потужності навантаження.

У [42] отримано залежності від параметрів СЕ максимально можливих і реальних значень ККД трифазної чотирьохпровідної системи електропостачання з синусоїдальними симетричними напругами джерела й асиметричним нелінійним навантаженням, еквівалентну схему якої подано на рисунку 1.1.

На рисунку 1.1 прийнято такі позначення:  $u_S$  – модуль просторового вектора напруги;  $U_m$  – амплітуда фазної синусоїдальної напруги;  $R_S$  – активний опір лінії, що з'єднує джерело й навантаження;  $R_N$  – активний

опір нульового проводу СЕ;  $i_p(t)$ ,  $i_q(t)$ ,  $i_r(t)$  – миттєві значення проекцій просторового вектора струму на осі р, q, r системи координат рqr відповідно.

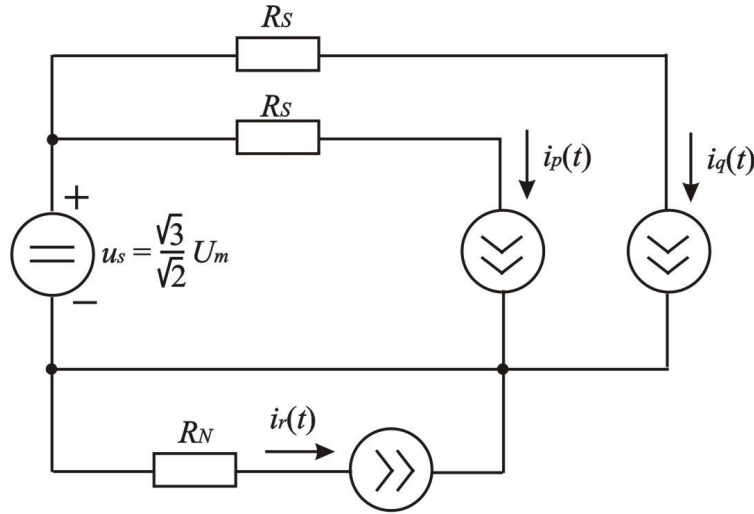


Рисунок 1.1 – Еквівалентна схема трифазної чотирипровідної системи електропостачання з синусоїдальними симетричними напругами джерела

Проекції вектора струму на осі р, q, r визначаються за відомими миттєвими значеннями трифазних струмів СЕ за такими співвідношеннями [38]:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta_1 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2 \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2 \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

де

$$\theta_1 = \arctg \frac{i_b - i_c}{\sqrt{3} \cdot i_a}, \quad (1.2)$$

$$\theta_2 = \arctg \frac{i_0}{i_{\alpha\beta}}, \quad (1.3)$$

$$i_{\alpha\beta} = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2}, \quad (1.4)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix}. \quad (1.5)$$

Отримані в [27] теоретичні та експериментальні залежності можна проілюструвати даними, наведеними в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Теоретичні та експериментальні залежності, що ілюструють змінювання ККД залежно від параметрів трифазної чотирипровідної СЕ

$k_{sc}=20, K_I=0,053, k_n=1, \eta_{\max}=0,947$							$k_{sc}=25, K_I=0,042, k_n=1, \eta_{\max}=0,958$					
$\varphi$	$\Delta_n$											
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1
0	0,947	0,947	0,944	0,935	0,921	0,902	0,958	0,958	0,956	0,948	0,937	0,921
$\pi/12$	0,934	0,934	0,931	0,923	0,909	0,890	0,947	0,947	0,945	0,938	0,926	0,911
$\pi/6$	0,919	0,919	0,916	0,908	0,894	0,876	0,935	0,935	0,933	0,926	0,915	0,900
$\pi/4$	0,899	0,899	0,896	0,888	0,876	0,858	0,919	0,919	0,917	0,910	0,899	0,885
$k_{sc}=30, K_I=0,035, k_n=1, \eta_{\max}=0,965$							$k_{sc}=50, K_I=0,02, k_n=1, \eta_{\max}=0,98$					
$\varphi$	$\Delta_n$											
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1
0	0,965	0,965	0,963	0,957	0,947	0,933	0,980	0,980	0,979	0,975	0,969	0,961
$\pi/12$	0,956	0,956	0,954	0,948	0,938	0,925	0,975	0,975	0,974	0,970	0,964	0,956
$\pi/6$	0,946	0,946	0,944	0,938	0,929	0,916	0,969	0,969	0,968	0,964	0,959	0,951
$\pi/4$	0,932	0,932	0,930	0,924	0,915	0,903	0,961	0,961	0,960	0,956	0,951	0,943

У таблиці 1.1 прийнято такі позначення:  $P_{SC}$  – потужність резистивного короткого замикання (далі – КЗ) СЕ;  $P_{usf}$  – корисна активна потужність, що співвідноситься з енергією, яка надходить у навантаження за інтервал часу, що дорівнює періоду повторюваності;

$$k_{sc} = \frac{P_{SC}}{P_{usf}}, \quad (1.6)$$

$$K_I \cong \frac{P_{usf}}{P_{SC}} - \quad (1.7)$$

коефіцієнти;

$$k_n = \frac{R_N}{R_S} - \quad (1.8)$$

відношення опору нульового проводу до опору фази;

$$\Delta_n = \frac{\sqrt{I_{N50}^2 + I_{N150}^2}}{I_{usf}}, \quad (1.9)$$

де  $I_{N50}$  – діюче значення 50-герцевої складової струму нульового проводу;  $I_{N150}$  – діюче значення 150-герцевої складової струму нульового проводу;  $I_{usf}$  – середній за період повторюваності активний (за віссю  $p$ ) струм навантаження;  $\varphi$  – кут зсуву між фазною напругою джерела й основною гармонікою струму навантаження;  $\eta_{\max}$  – максимально можливий ККД СЕ при  $\varphi = 0$ ,  $\Delta_n = 0$ .

Аналіз даних, наведених в таблиці 1.1 і в роботах [46; 47] доводить, що внаслідок застосування силових активних фільтрів, накопичувачів енергії, які забезпечують компенсацію пульсацій миттєвої активної потужності, і активних випрямлячів можна досягти підвищення ККД СЕ в середньому на 5–7% при одночасному поліпшенні якості електроенергії: зменшенні коефіцієнта несинусоїдальності й значення відхилень напруги в точках загального приєднання навантаження (далі – РСС).

### 1.1.2 Використання енергоємних накопичувачів енергії

Параметри акумуляторів і суперконденсаторів, такі як питома енергоємність, допустима кількість циклів заряду-розряду, швидко поліпшуються [30; 84]. Уже сьогодні можна ефективно застосовувати суперконденсатори в низці систем електропостачання. Як приклад розглянемо СЕ рухомого складу метрополітену [33; 37]. Детальніше системи електропостачання метрополітену за енергетичною ефективністю розглянуто в підрозділі 4.1.

Електропостачання електропоїздів українських метрополітенів здійснюється від тягової контактної мережі постійного струму напругою 825 В. Контактна мережа живиться від підземних або наземних підстанцій, які підмикаються до мережі 6 (10) кВ через знижувальний трансформатор і некерований шестипульсний випрямляч. Односпрямований потік енергії від мережі до навантаження обумовлює значні сумарні втрати енергії в такій СЕ, що складаються з втрат в пристроях тягових підстанцій  $\Delta E_S$ , втрат в контактній мережі  $\Delta E_d$ , втрат в елементах електроприводу  $\Delta E_{ASD}$  і втрат в гальмівних резисторах  $\Delta E_{BR}$  [33; 37]

$$\Delta E_{\Sigma} = \Delta E_S + \Delta E_d + \Delta E_{ASD} + \Delta E_{BR}. \quad (1.10)$$

Альтернативою наявної СЕ рухомого складу метрополітену є системи електропостачання, що використовують енергоємні накопичувачі



енергії (далі – НЕ). До того ж можливі два варіанти розміщення накопичувача – стаціонарне (на тяговій підстанції) і бортове (на борту електропоїзда), як це показано на рисунку 1.2.

Вибір того чи іншого варіанта розміщення НЕ залежить від зіставлення техніко-економічних і експлуатаційних показників у процесі прийняття індивідуальних проектних рішень. Обидва варіанти розміщення дають змогу скоротити сумарну енергію, яка споживається рухомим складом із мережі, і зменшити рівень втрат енергії в елементах СЕ [37]. Зменшення споживаної з мережі енергії досягається циркуляцією в СЕ двоспрямованого енергетичного потоку, при якому максимальна кінетична енергія, що накопичується електропоїздом у момент закінчення розгону, не розсіюється в гальмівних резисторах, а надсилається в накопичувач енергії. З мережі споживається енергія, необхідна для живлення допоміжного електротехнічного обладнання (привід дверей, освітлення, вентиляція, зв'язок), енергія, що витрачається на подолання опору повітря в тунелі й тертя колісної бази, і енергія, еквівалентна втратам в елементах СЕ.

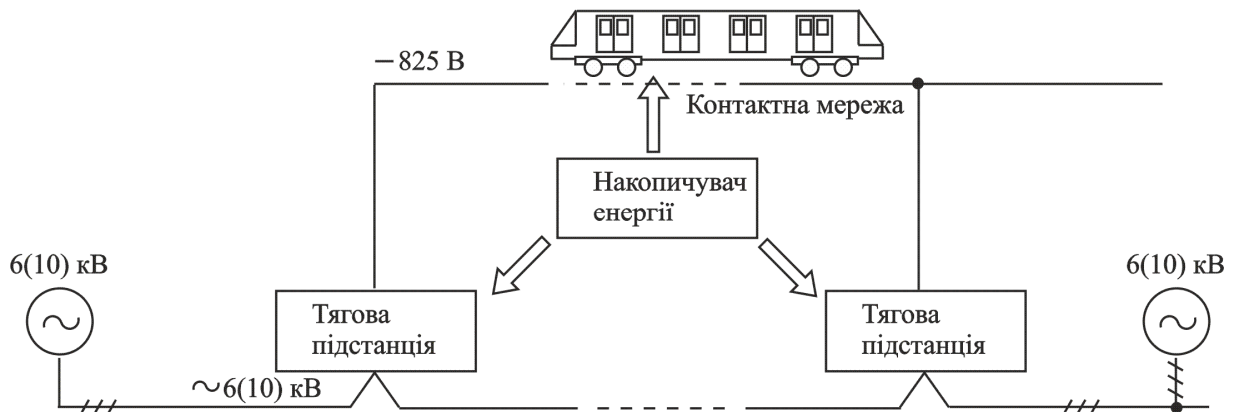


Рисунок 1.2 – Варіанти розміщення накопичувача енергії в системах електропостачання рухомого складу метрополітену

У разі розміщення НЕ на тяговій підстанції сумарні втрати енергії в СЕ визначають так:

$$\Delta E_{\Sigma st} = \Delta E_S + \Delta E_d + \Delta E_{ASD} + \Delta E'_d + \Delta E'_{ASD} + \Delta E_{ES1}, \quad (1.11)$$

де  $\Delta E'_d$ ,  $\Delta E'_{ASD}$  – приведені втрати енергії в контактній мережі й елементах електроприводу при зворотному потоці з навантаження в НЕ відповідно;  $\Delta E_{ES1}$  – втрати в накопичувачі енергії.

При бортовому розміщенні НЕ сумарні втрати енергії зменшаться на величину  $\Delta E'_d$ :

$$\Delta E_{\Sigma b} = \Delta E_S + \Delta E_d + \Delta E_{ASD} + \Delta E'_{ASD} + \Delta E_{ES1}. \quad (1.12)$$

Можливий варіант використання бортового накопичувача енергії в безконтактній СЕ. Масогабаритні характеристики накопичувача в такій системі електропостачання збільшуються, однак відбувається значне зменшення втрат енергії внаслідок відсутності контактної мережі

$$\Delta E_{\Sigma b} = \Delta E_S + \Delta E_{ASD} + \Delta E'_{ASD} + \Delta E_{ES2}, \quad (1.13)$$

де  $\Delta E_{ES2}$  – втрати енергії в накопичувачі при безконтактній СЕ.

У таблиці 1.2 порівняно результати розрахування сумарної енергії, що споживається з мережі, і втрат енергії для чотирьох зазначених систем електропостачання рухомого складу метрополітену відносно традиційної СЕ без накопичувача енергії. Під час проведення розрахунку було зроблено припущення, що енергія власних потреб електропоїзду становить 10 % від максимуму кінетичної енергії, а енергія, що витрачається на подолання опору повітря в тунелі і тертя, – 20 %.

Таблиця 1.2 – Порівняння результатів розрахування сумарної енергії, що споживається з мережі, і втрат енергії для чотирьох систем електропостачання рухомого складу метрополітену

Тип СЕ	Сумарна відносна енергія, що споживається з мережі, $E_{S*}$	Сумарні відносні втрати енергії, $\Delta E_{\Sigma*}$
Традиційна	1	1
Зі стаціонарним НЕ	0,435	0,301
З бортовим НЕ	0,317	0,155
Безконтактна з бортовим НЕ	0,295	0,128

Аналіз даних таблиці 1.2 дає змогу зробити висновок, що використання енергоємних накопичувачів у системах електропостачання рухомого складу метрополітену уможливорює зменшення споживання енергії з мережі в 2,3–3,4 рази при одночасному зниженні втрат енергії в 3,3–7,8 разів.

### 1.1.3 Модернізація системи електропостачання комунальних споживачів енергії

У розвинених країнах світу комунальні об'єкти споживають понад 30% всієї електроенергії, що виробляється [73]. Спрощену схему СЕ комунальних споживачів подано на рисунку 1.3.

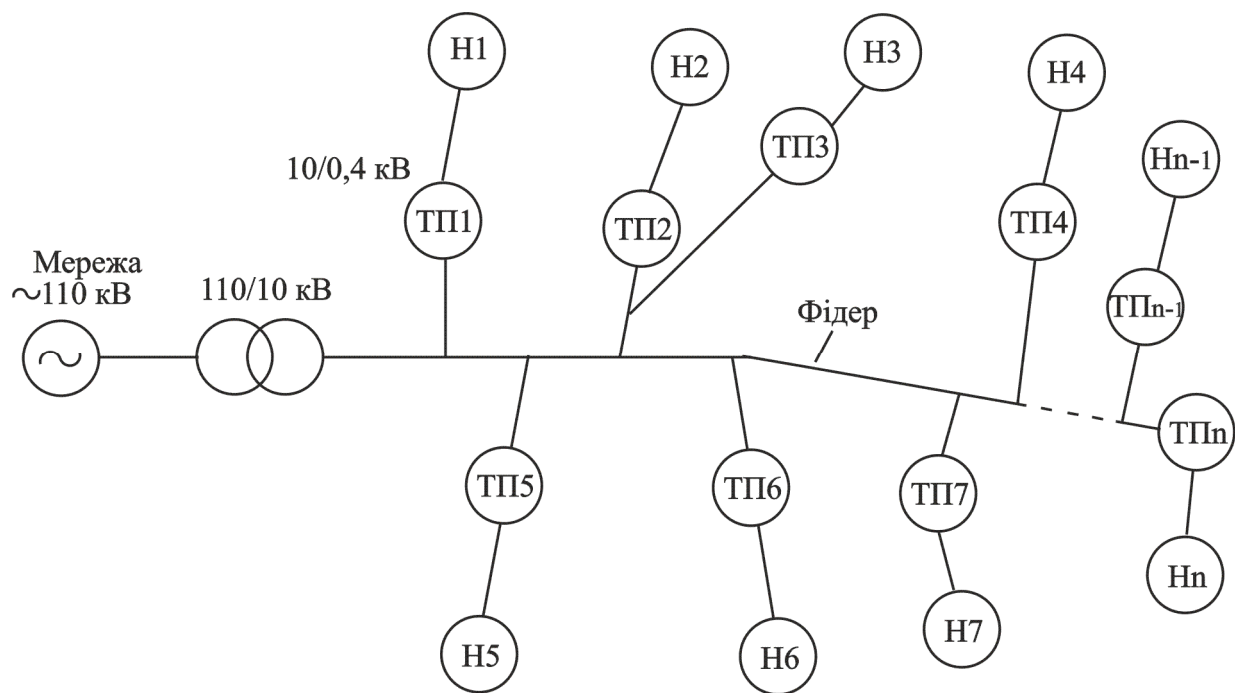


Рисунок 1.3 – Спрощена схема СЕ комунальних споживачів

Від трансформатора 110/10 кВ, встановленого на високовольтній підстанції, прокладено фідер у кілька кілометрів завдовжки. До фідера в різних точках підімкнено кілька десятків трансформаторних підстанцій 10/0,4 кВ (ТП1-ТПn), первинні обмотки трансформаторів, встановлених на ТП, з'єднані у зірку, а вторинні – у зірку з нульовим проводом. Від кожної ТП через кабельні або повітряні лінії, довжина яких може досягати 100 метрів і більше, живляться кілька споживачів (Н1-Нn).

Три фактори визначають необґрунтовано великі втрати в наявних комунальних СЕ [57], навантаження яких різняться значною пофазною асиметрією і нелінійністю: з'єднання первинних обмоток трансформаторів, що встановлюються на ТП, у зірку при асиметрії струмів у вторинних обмотках, що спричиняє додаткові втрати внаслідок насичення магнітної системи; фазовий зсув основної гармоніки струму навантаження відносно напруги, пульсації миттєвої активної потужності й недорівнюваність нулю реактивної потужності; однофазна система розведення напруг до споживачів енергії всередині комунального об'єкта.

Усунення цих факторів в СЕ уможливить значне зменшення втрат енергії, а отже, підвищення ККД.

Розглянемо шляхи усунення зазначених факторів.

Перший фактор, що обумовлює додаткові втрати енергії, зникає, якщо ліквідувати два інші. Для ліквідації другого фактора досить встановити на вході в Smart Building силовий активний фільтр з

накопичувачем енергії, що забезпечує синусоїдальність фазних струмів і їх збіг за фазою з фазними напругами.

На рисунку 1.4 подано схему СЕ з силовим активним фільтром (PAF), накопичувачем енергії (ES), сонячною батареєю (SB) і перетворювачем постійної напруги на постійну (DC/DC). Струми  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  на вході СЕ синусоїдальні і збігаються або протилежні за фазою з напругами  $u_{sa}$ ,  $u_{sb}$ ,  $u_{sc}$ .

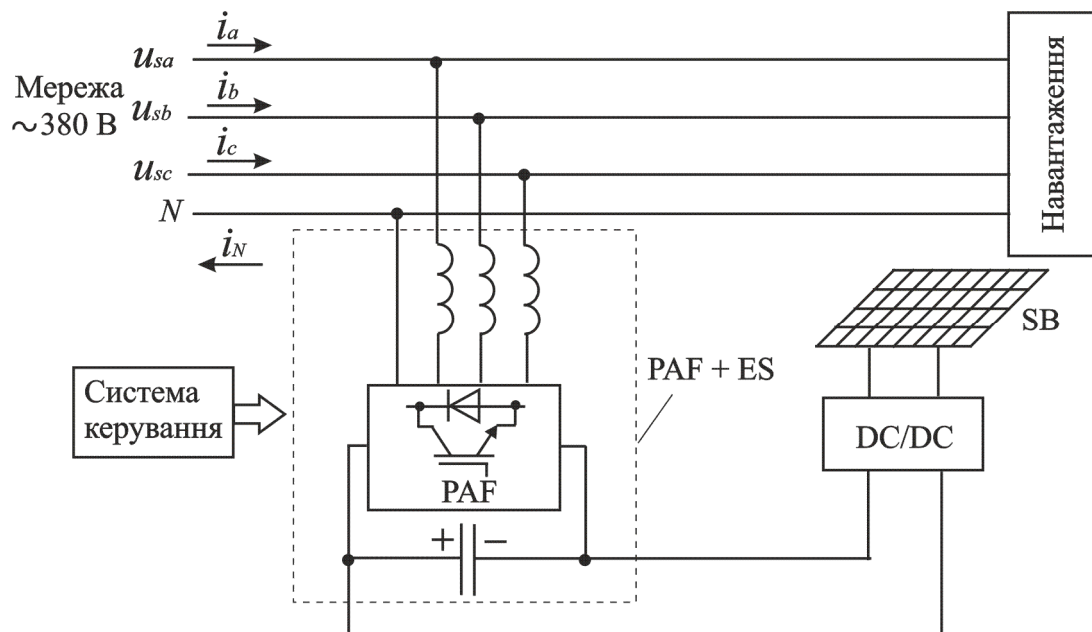


Рисунок 1.4 – Схема СЕ з силовим активним фільтром (PAF), накопичувачем енергії (ES), сонячною батареєю (SB) і перетворювачем постійної напруги в постійну (DC/DC)

Для повної компенсації вектора реактивної потужності теоретично накопичувач енергії не потрібний [47]. Він необхідний для компенсації пульсацій миттєвої активної потужності. Необхідна енергоємність накопичувача тим більша, чим більшим є період повторюваності графіка миттєвої активної потужності. Сучасні накопичувачі енергії — акумулятори, суперконденсатори тощо — забезпечують компенсування пульсації з періодом повторюваності в кілька десятків секунд. Однак темпи вдосконалення накопичувачів дають змогу сподіватися на значне збільшення їх енергоємності в недалекому майбутньому і, відповідно, збільшення тривалості інтервалу повторюваності, за якого можлива компенсація, до десятків хвилин і кількох годин.

Концепція Smart Grid передбачає радикальну зміну топології СЕ. Зокрема, в ряді публікацій обговорюється можливість переходу від СЕ з однофазним джерелом синусоїдальної напруги до СЕ з джерелом постійної напруги [52; 60; 89]. На нашу думку, перспективнішим є перехід у комунальних СЕ до трифазних симетричних систем синусоїдальних напруг, що уможливить збереження трансформаторів ТП і кабелів, що з'єднують ТП із комунальними споживачами – житловими і суспільно-адміністративними будівлями, освітлювальними установками, а отже, значне зменшення втрат енергії і витрат провідникового матеріалу в кабелях для підімкнення побутових приладів до мережі [21].

Розглянемо приклад, наведений у [26]. На рисунку 1.5 подано еквівалентні схеми з [26] трифазної симетричної (рис. 1.5, а) і однофазної (рис. 1.5, б) СЕ. В обох схемах напруги джерел синусоїдальні, навантаження – активно-індуктивні й лінійні.

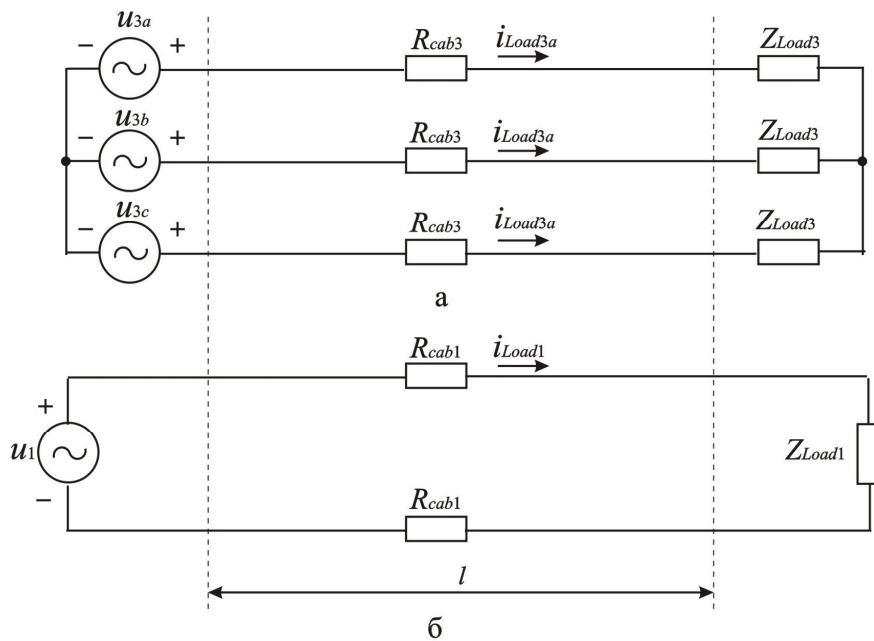


Рисунок 1.5 – Еквівалентні схеми трифазної симетричної (а) і однофазної (б) СЕ.

Позначення, прийняті на рисунку 1.5:  $l$  – довжина кабелю між джерелом і навантаженням;  $u_{3a}$ ,  $u_{3b}$ ,  $u_{3c}$  – фазні синусоїдальні напруги трифазного джерела;  $u_1$  – фазна синусоїдальна напруга однофазного джерела;  $Z_{Load1}$ ,  $Z_{Load3}$  – модулі опору навантаження однофазної і трифазної СЕ відповідно;  $R_{cab1}$ ,  $R_{cab3}$  – опори однієї жили кабелю однофазної і трифазної СЕ відповідно;  $i_{Load1}$ ,  $i_{Load3}$  – миттєві значення струму навантаження однофазної і трифазної СЕ відповідно.

Вважатимемо, що однофазна й трифазна СЕ працюють в сталому режимі з однаковими кутами зсуву  $\varphi$  за однієї і тієї самої середньої за період повторюваності активної потужності навантаження

$$P_{L1} = P_{L3} = P. \quad (1.14)$$

Значення амплітуд фазних напруг зв'яжемо коефіцієнтом

$$k_U = \frac{U_{m1}}{U_{m3}}, \quad (1.15)$$

де  $U_{m1}$ ,  $U_{m3}$  – амплітуди напруги джерела однофазної еквівалентної схеми і трифазної еквівалентної схеми відповідно.

Можливий діапазон змінювання коефіцієнта

$$1 \leq k_U \leq \sqrt{3}. \quad (1.16)$$

Приймемо, що довжини кабелів і щільність струму  $\gamma$  в кабелях однофазної і трифазної СЕ однакові. За прийнятих умов втрати енергії і витрата міді в цих СЕ будуть визначатись за таким співвідношенням:

$$\frac{\Delta P_{cab3}}{\Delta P_{cab1}} = \frac{\Delta M_3}{\Delta M_1} = \frac{k_U \cdot k_{\Delta P}}{2}. \quad (1.17)$$

де  $k_{\Delta P}$  – коефіцієнт, що враховує значення потужності втрат в СЕ. При значенні потужності втрат 10 % від потужності мережі  $k_{\Delta P} = 0,9 - 1,111$ .

На рисунку 1.6 наведено залежності, що ілюструють ефективність переходу від однофазної до трифазної СЕ за різних значень коефіцієнта  $k_{\Delta P}$ . При  $k_U = k_{\Delta P} = 1$  втрати енергії і витрата міді зменшуються в два рази.

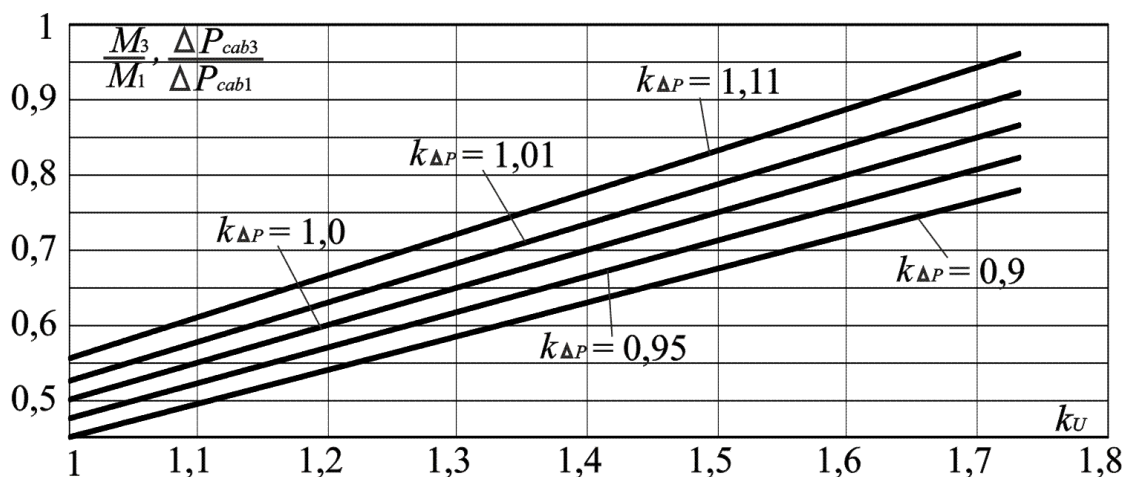


Рисунок 1.6 – Ефективність переходу від однофазної до трифазної СЕ

Залежності (1.17) – наближені. Точна оцінка переходу від однофазної комунальної СЕ до трифазної передбачає врахування низки додаткових чинників, а саме: рівень допустимої номінальної лінійної напруги в

трифазній СЕ, перехід до розеток і вилок нової конструкції, що унеможливило підімкнення споживачів до лінійної напруги, перехід до трифазних джерел живлення й трифазних двигунів в електронних і побутових електроприладах та інших навантаженнях.

## **1.2 ККД систем електропостачання постійної напруги й трифазної симетричної системи синусоїдальних напруг**

Сумарні втрати електроенергії в елементах систем електропостачання – генераторах, кабельних і повітряних лініях, трансформаторах, реакторах, напівпровідникових перетворювачах, компенсаторах, накопичувачах енергії, комутуючих апаратах – можуть перевищувати 10–15 % від обсягу електроенергії, що виробляється; до того ж основна частка втрат припадає на кабелі, повітряні лінії, трансформатори й реактори [72]. Оскільки у світі в електричному вигляді транспортується і передається близько половини всієї споживаної енергії, підвищення коефіцієнта корисної дії систем електропостачання навіть на один відсоток дає змогу зекономити значні матеріальні ресурси. Переважна частина електричної енергії передається від джерела до навантаження за допомогою трифазних симетричних систем синусоїдальної напруги, менша частина, одиниці відсотків – за допомогою СЕ постійної напруги. Середній для заданого інтервалу часу ККД СЕ, що визначається як відношення кількості енергії, яка надходить до навантаження, до енергії, що віддається джерелом, залежить від омичного опору лінії й діючого значення струму в ній, відповідно, від форми графіка миттєвої активної потужності. Максимальний ККД СЕ досягається при забезпеченні двох умов:

- 1) енергія передається від джерела до навантаження з постійною швидкістю, тобто при незмінному значенні миттєвої активної потужності;
- 2) відсутній двоспрямований обмін енергією між елементами СЕ, тобто форма струму джерела співпадає з формою напруги джерела.

Для СЕ постійної напруги зазначені умови очевидні, до того ж виконання першої з них означає одночасне виконання другої.

Трифазна симетрична система з синусоїдальними напругами джерела при чисто резистивному навантаженні й за відсутності в ній реактивних елементів повністю еквівалентна СЕ постійної напруги [48].

У підрозділі 1.2 розглядаються методи визначення максимально можливого й реального ККД систем електропостачання двох типів –

постійної напруги й трифазної симетричної системи синусоїдальної напруги.

Уведено параметр «втрата ККД», який визначається, як різниця між максимально можливим і реальним розглядуваним ККД СЕ.

### 1.2.1 Система електропостачання постійної напруги

Еквівалентну схему СЕ постійної напруги наведено на рисунку 1.7.

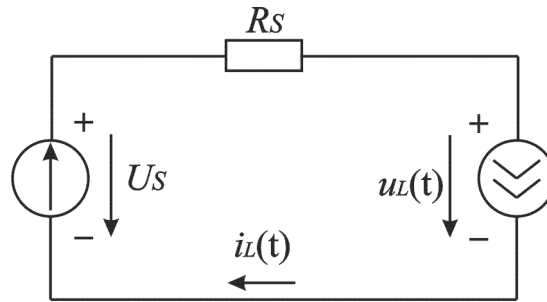


Рисунок 1.7 – Еквівалентна схема СЕ постійної напруги

Напругу джерела й омичний опір лінії в еквівалентній схемі приймемо незмінними в часі:

$$\left. \begin{aligned} U_S &= const, \\ R_S &= const, \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

а напругу й струм навантаження – такими, що змінюються в часі:

$$\left. \begin{aligned} u_L &= f_u(t), \\ i_L &= f_i(t). \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

Припустимо, що процеси в СЕ мають період повторюваності  $T$ :

$$\left. \begin{aligned} u_L(t) &= u_L(t+T), \\ i_L(t) &= i_L(t+T). \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

Графік струму навантаження  $i_L(t)$  визначається технологічним процесом у навантаженні.

Миттєва напруга на клеммах навантаження

$$u_L(t) = U_S - R_S \cdot i_L(t), \quad (1.21)$$

відповідно миттєві активні потужності джерела, навантаження й значення потужності втрат енергії в лінії

$$p_S(t) = U_S \cdot i_L(t), \quad (1.22)$$

$$p_L(t) = U_S \cdot i_L(t) - R_S \cdot i_L^2(t), \quad (1.23)$$

$$p_{loss}(t) = R_S \cdot i_L^2(t). \quad (1.24)$$



Очевидно, що

$$p_S(t) - p_{loss}(t) = p_L(t). \quad (1.25)$$

Введемо поняття корисної активної потужності, що дорівнює середньому значенню активної потужності навантаження за період повторюваності:

$$P_{usf} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p_L(t) dt \quad (1.26)$$

і визначає величину енергії, що надходить у навантаження за період повторюваності:

$$E_{usf} = P_{usf} \cdot T. \quad (1.27)$$

Значення  $P_{usf}$  може відрізнятися від номінальної потужності СЕ  $P_{nom}$ , за якою розраховуються її елементи, тобто СЕ може працювати в номінальному режимі, з перевантаженням або недовантаженням, до того ж від режиму роботи залежатиме її ККД.

Режим роботи системи характеризується відношенням потужності резистивного короткого замикання (КЗ), що дорівнює

$$P_{SC} = \frac{U_S^2}{R_S}, \quad (1.28)$$

до корисної потужності:

$$k_{SC} = \frac{P_{SC}}{P_{usf}} = \frac{U_S^2}{R_S \cdot P_{usf}}. \quad (1.29)$$

Введемо також поняття «корисного струму навантаження»  $I_{usf}$ , за якого енергія надходить до навантаження з постійною середньою швидкістю, що дорівнює  $P_{usf}$ , і поняття струму резистивного КЗ СЕ

$$I_{SC} = \frac{U_S}{R_S}, \quad (1.30)$$

Очевидно, що

$$P_{usf} = U_S \cdot I_{usf} - R_S \cdot I_{usf}^2. \quad (1.31)$$

Позначивши

$$K_I = \frac{I_{usf}}{I_{SC}}, \quad (1.32)$$

із співвідношень (1.28), (1.30) – (1.32) отримаємо:

$$K_I = \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{k_{SC}}}. \quad (1.33)$$

Співвідношення (1.33) однозначно пов'язує коефіцієнти  $K_I$  і  $k_{SC}$ , накладаючи обмеження

$$k_{SC} \geq 4, \quad (1.34)$$

яке фактично завжди із запасом виконується в реальних СЕ.

Миттєвий ККД СЕ при довільному струмі навантаження визначається так:

$$\eta = \frac{U_s \cdot i_L(t) - R_s \cdot i_L^2(t)}{U_s \cdot i_L(t)}. \quad (1.35)$$

Із (1.30), (1.32), (1.35) отримаємо:

$$\eta = 1 - i_{L*}(t) \cdot K_I, \quad (1.36)$$

де

$$i_{L*}(t) = \frac{i_L(t)}{I_{usf}} - \quad (1.37)$$

відносно значення миттєвого струму навантаження.

Якщо пульсації струму відсутні, то  $i_{L*} = 1$  і миттєве значення ККД із урахуванням (1.32), (1.33) і (1.37) визначається, як

$$\eta = \eta_{AV} = \eta_{\max} = 1 - K_I = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{k_{SC}}}, \quad (1.38)$$

тобто робота СЕ з незмінним струмом навантаження співвідноситься з максимально можливим значенням ККД, що безперечно залежить від відношення корисного струму навантаження до струму КЗ або від відношення потужності КЗ до корисної потужності навантаження.

На рисунку 1.8 наведено криву, що ілюструє залежність  $K_I = f(k_{SC})$  відповідно (1.33). Та сама залежність, а також значення максимально можливого середнього за період повторюваності ККД СЕ наведено в таблиці 1.3.

У другому рядку таблиці 1.3 наведено точні значення  $K_I$ , розраховані для заданого значення  $k_{SC}$  за співвідношенням (1.33), а в четвертому рядку – наближені значення  $K_I$ , що визначені за співвідношенням (1.7).

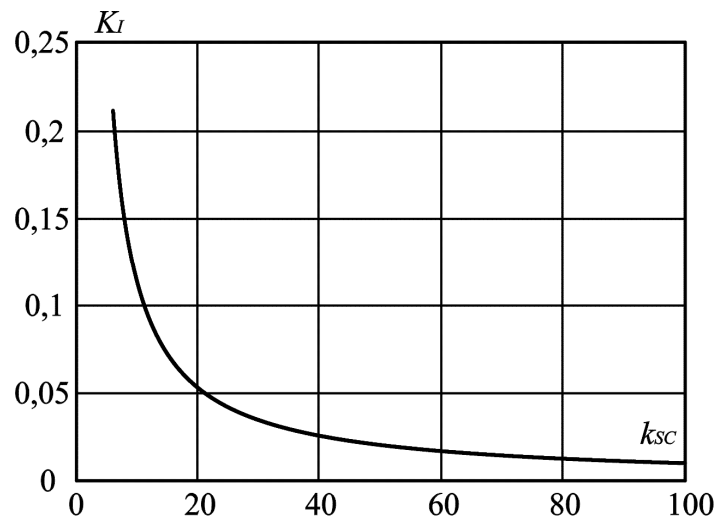


Рисунок 1.8 – Залежність відносного значення середнього струму навантаження від відношення потужності резистивного КЗ до корисної потужності

Як зрозуміло з таблиці 1.3, при  $k_{SC} \geq 20$  точні й наближені значення  $K_I$  фактично співпадають.

Ще раз зазначимо, що при заданому в таблиці 1.3 значенні  $k_{SC}$  або  $K_I$  максимально можливі значення ККД,  $\eta_{\max}$ , вказані у відповідній комірці третього рядка таблиці 1.3, отримаємо в режимі роботи СЕ з постійною швидкістю передачі енергії від джерела до навантаження, що дорівнює  $P_{usf}$ . Якщо швидкість передачі енергії змінюється, то миттєвий ККД визначається з (1.36), (1.37). Із огляду на те, що у співвідношенні (1.36) коефіцієнт  $K_I$  залежить від форми струму  $i_L^*(t)$ , визначати середнє значення ККД за період повторюваності шляхом інтегрування (1.36) при  $K_I = \text{const}$  некоректно. Для коректного розрахунку середнього значення ККД за період повторюваності варто спочатку задати форму струму  $i_L(t)$  або форму графіка миттєвої активної потужності навантаження

$$p_L(t) = U_S \cdot i_L(t) - R_S \cdot i_L^2(t). \quad (1.39)$$

Таблиця 1.3 – Максимально можливі значення ККД СЕ

$k_{SC}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$K_I$ за (1.33)	0,5	0,211	0,146	0,113	0,092	0,077	0,067	0,059	0,052	0,042	0,034	0,026	0,02	0,017	0,014	0,01
$\eta_{\max}$	0,5	0,789	0,854	0,887	0,909	0,923	0,933	0,941	0,947	0,958	0,965	0,974	0,98	0,983	0,986	0,99
$K_I$ за (1.7)	0,25	0,167	0,125	0,1	0,083	0,071	0,063	0,056	0,05	0,04	0,033	0,025	0,02	0,017	0,014	0,01

Припустимо, що струм навантаження можна подати у вигляді постійної складової, що дорівнює корисному струму  $I_{ref}$ , і змінної складової, середнє значення якої (розраховане в періоді повторюваності) дорівнює нулю:

$$i_L = I_{ref} + i_{\tilde{L}}(t). \quad (1.40)$$

Розглянемо малий інтервал часу  $\Delta t_+$ , в якому  $i_{\tilde{L}}(t) > 0$ . У цьому інтервалі

$$i_{L+} = I_{ref} + i_{\tilde{L}+}. \quad (1.41)$$

Припустимо, що крива  $i_{\tilde{L}}(t)$  симетрична відносно прямої  $I_{ref}$  так, що кожному інтервалу  $\Delta t_+$  відповідає інтервал  $\Delta t_-$ , в якому змінна складова струму від'ємна. То того ж:

$$i_{\tilde{L}+} = |i_{\tilde{L}-}|, \quad (1.42)$$

$$i_{L-} = I_{ref} - |i_{\tilde{L}-}|. \quad (1.43)$$

Середнє значення ККД у малому інтервалі, що розглядається,

$$\eta_{\Delta t} = \frac{U_S I_{usf} - \frac{1}{2} R_S (I_{usf} + |i_{\tilde{L}}|)^2 - \frac{1}{2} R_S (I_{usf} - |i_{\tilde{L}}|)^2}{U_S I_{usf}}. \quad (1.44)$$

З урахуванням (1.32) за (1.44) отримаємо:

$$\eta_{\Delta t} = 1 - \frac{I_{usf}}{U_S / R_S} - \frac{R_S \cdot i_{\tilde{L}}^2}{U_S I_{usf}} = 1 - \frac{I_{usf}}{I_{SC}} - \frac{I_{usf} \cdot i_{\tilde{L}}^2}{I_{SC} \cdot I_{usf}^2}. \quad (1.45)$$

Підставивши в (1.45) співвідношення (1.32) і (1.37), отримаємо кінцеву розрахункову формулу:

$$\eta_{\Delta t \rightarrow 0} = 1 - K_I - K_I \cdot i_{\tilde{L}*}^2. \quad (1.46)$$

Прийmemo, що

$$i_{\tilde{L}*} = \Delta_I \sin \vartheta, \quad (1.47)$$

де

$$\vartheta = 2\pi \frac{t}{T}, \quad (1.48)$$

тоді  $0 \leq \Delta_I \leq 1$ .

Середнє значення ККД в періоді повторюваності визначимо інтегруванням співвідношення (1.46) після підстановки в нього  $i_{\tilde{L}*}$  з (1.47):

$$\eta_{AVreal} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi (1 - K_I - K_I \Delta_I^2 \sin^2 \vartheta) d\vartheta, \quad (1.49)$$

$$\eta_{AVreal} = 1 - K_I - \frac{1}{2} K_I \Delta_I^2. \quad (1.50)$$

У таблиці 1.4 наведено значення середнього значення ККД за період повторюваності в разі зміни відносної амплітуди змінної складової струму навантаження  $\Delta_I$ , розраховані за співвідношенням (1.50).

Таблиця 1.4 – Теоретичні реальні значення ККД СЕ

$k_{SC}$	4	8	10	12	14	15	16	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$\Delta_I/K_I$	0,5	0,146	0,113	0,092	0,077	0,072	0,067	0,059	0,052	0,042	0,034	0,026	0,02	0,017	0,014	0,01
0	0,5	0,854	0,887	0,909	0,923	0,928	0,933	0,941	0,947	0,958	0,965	0,974	0,98	0,983	0,986	0,99
0,1	–	0,853	0,886	0,908	0,923	0,928	0,933	0,941	0,947	0,958	0,965	0,974	0,98	0,983	0,986	0,99
0,25	–	0,849	0,883	0,905	0,921	0,926	0,931	0,939	0,946	0,957	0,964	0,973	0,979	0,982	0,986	0,99
0,5	–	0,836	0,873	0,897	0,913	0,919	0,925	0,934	0,94	0,953	0,961	0,971	0,978	0,981	0,984	0,989
0,75	–	0,813	0,855	0,882	0,901	0,908	0,914	0,924	0,932	0,946	0,955	0,967	0,974	0,978	0,982	0,987
1	–	0,781	0,831	0,862	0,885	0,892	0,9	0,912	0,921	0,937	0,948	0,961	0,97	0,975	0,979	0,985

Аналогічні залежності  $\eta_{AVreal} = f(k_{SC}, \Delta_P)$ , де  $\Delta_P$  – відносна амплітуда синусоїдальної змінної складової потужності навантаження наведені в [46]. Співставлення даних таблиці 1.4 і відповідних даних таблиці 1.3 в [46] доводить, що при  $k_{SC} > 15$  і  $\Delta_I = \Delta_P$  відмінність ККД не перевищує 1 %. При  $8 < k_{SC} < 15$  і  $\Delta_I = \Delta_P$  відмінність ККД може досягати 9 %.

Зазначена відмінність ККД пояснюється тим, що графіки миттєвої активної потужності й миттєвого струму навантаження загалом не співпадають за формою, оскільки параметр  $\Delta_I$  в таблиці 1.4 і параметр  $\Delta_P$  в [46] не співпадають. Покажемо, як пов'язані коефіцієнти  $\Delta_I$  і  $\Delta_P$  при заданому значенні ККД.

Струм навантаження в (1.40), (1.47) становить відповідно:

$$i_L = I_{usf} + \Delta_I I_{usf} \sin \vartheta. \quad (1.51)$$

Квадрат струму навантаження –

$$i_L^2 = I_{usf}^2 + 2\Delta_I I_{usf} \sin \vartheta + \Delta_I^2 I_{usf}^2 \sin^2 \vartheta. \quad (1.52)$$

Миттєва активна потужність навантаження –

$$p_L = U_S I_{usf} + U_S \Delta_I I_{usf} \sin \vartheta - R_S I_{usf}^2 - 2R_S \Delta_I I_{usf} \sin \vartheta - R_S \Delta_I^2 I_{usf}^2 \sin^2 \vartheta. \quad (1.53)$$

Подано  $p_L$  у вигляді суми постійної і змінної складових:

$$p_L = P_{usf} + \Delta_I (P_{usf} - R_S I_{usf}^2) \sin \vartheta - R_S \Delta_I^2 I_{usf}^2 \sin^2 \vartheta. \quad (1.54)$$

Не беручи до уваги в (1.54) член, що містить добуток  $\Delta_I^2 \sin^2 \vartheta$  (з огляду на його незначущість) отримаємо:

$$\frac{p_L}{P_{usf}} \cong 1 + \left( \Delta_I - \Delta_I \frac{R_S I_{usf}^2}{P_{usf}} \right) \sin \vartheta, \quad (1.55)$$

звідки

$$\Delta_P \cong \Delta_I - \Delta_I \frac{R_S I_{usf}^2}{P_{usf}} \quad (1.56)$$

або

$$\Delta_P \cong \Delta_I - \Delta_I \left( \frac{1}{\eta_{AVreal}} - 1 \right). \quad (1.57)$$

Неважко зрозуміти, що дані в таблицях 1.4 і 1.3 [46] відповідають співвідношенню (1.57) з достатньою для практичних розрахунків точністю. Дані таблиці 1.4 можна використати для практичного розрахування максимального й реального ККД СЕ постійного струму при відомих значеннях еквівалентного опору лінії електропостачання  $R_S$  і графіка змінної складової струму навантаження  $i_L$  або графіка змінної складової миттєвої активної потужності  $p_L$ .

У деяких випадках в графіках струму навантаження або миттєвої активної потужності навантаження можна виокремити декілька складових з різними періодами повторюваності. У цьому разі ККД може зменшитися більше порівняно з тим, коли наявна одна змінна складова.

Зручнішою для розрахунків може бути таблиця 1.5, в якій наведено втрати ККД  $\Delta\eta$ , що розраховуються, як різниця між максимально можливим ККД СЕ і реальним ККД при синусоїдальній змінній складовій струму навантаження з відносною амплітудою  $\Delta_I$ :

$$\Delta\eta = \eta_{\max} - \eta_{AVreal}. \quad (1.58)$$

Таблиця 1.5 – Втрати ККД СЕ

$k_{SC}$	6	10	12	14	15	16	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$\Delta_I/K_I$	0,211	0,113	0,092	0,077	0,072	0,067	0,059	0,052	0,042	0,034	0,026	0,020	0,017	0,014	0,010
0,1	0,001	0,001	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	0,007	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0	0
0,5	0,026	0,014	0,012	0,010	0,009	0,008	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001
0,75	0,059	0,032	0,027	0,022	0,020	0,019	0,017	0,015	0,012	0,010	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003
1	0,105	0,056	0,047	0,038	0,036	0,033	0,029	0,026	0,021	0,017	0,013	0,010	0,008	0,007	0,005

Зазначимо, що втрати ККД визначаються формою змінної складової струму навантаження або миттєвої активної потужності і не залежать від частоти змінної складової.

У разі накладання декількох пульсацій миттєвої активної потужності з різними частотами втрати ККД значно збільшуються порівняно з даними таблиці 1.5 [46].

### 1.2.2 Трифазна симетрична система електропостачання синусоїдальних напруг з активним навантаженням

Схему трифазної СЕ з синусоїдальними напругами джерела подано на рисунку 1.9.

Як зрозуміло з рисунка 1.9, амплітуда фазної напруги  $U_m$  і опір фази лінії  $R_S$  – константи, а амплітуда фазного струму навантаження змінюється в функції часу.

Еквівалентну розрахункову схему трифазної СЕ подано на рисунку 1.10.

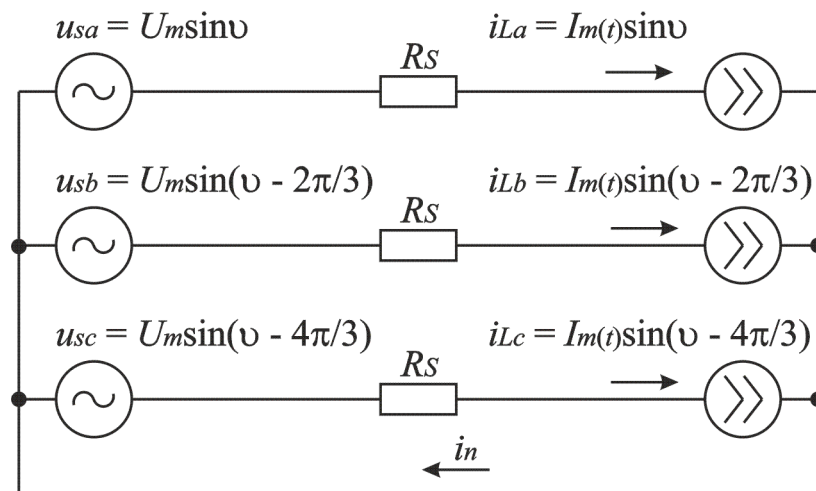


Рисунок 1.9 – Трифазна СЕ з синусоїдальними симетричними напругами

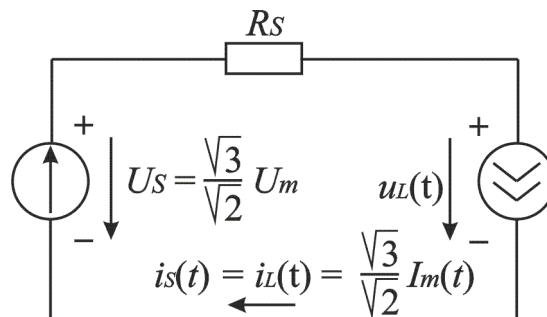


Рисунок 1.10 – Еквівалентна схема трифазної СЕ з активним симетричним навантаженням

Якщо порівняти еквівалентні схеми, наведені на рисунках 1.7 і 1.10, то стане зрозумілим, що вони співпадають із точністю до постійних коефіцієнтів. Дійсно, постійну напругу  $U_S$  у схемі рисунка 1.10 відповідно прийнято такою що дорівнює значенню модуля просторового вектора трифазної мережевої напруги:

$$U_S = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} U_m. \quad (1.59)$$

Прийнято також, що миттєвий струм навантаження в еквівалентній схемі дорівнює модулю просторового вектора трифазного струму навантаження:

$$i_L(t) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_m(t), \quad (1.60)$$

де  $I_m(t)$  – повільно змінювана (порівнянні з частотою мережі) амплітуда струму навантаження.

Зазначимо, що в розглядуваних системах (рис. 1.7, 1.10) значення миттєвих і середніх активних потужностей співпадають:

$$p(t) = U_S i_L(t) = \frac{3}{2} U_m I_m(t), \quad (1.61)$$

$$P_{AV} = U_S I_{AV} = \frac{3}{2} U_m I_{mAV}. \quad (1.62)$$

Корисний фазний струм у схемі рисунка 1.9 –

$$I_{usfph} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{I_m(t)}{\sqrt{2}} dt. \quad (1.63)$$

Корисний струм в еквівалентній схемі рисунка 1.10 –

$$I_{usf} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_m(t) dt. \quad (1.64)$$

Корисна активна потужність у початковій і еквівалентній схемах –

$$P_{usf} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left( \frac{3}{2} U_m I_m(t) - R_S \frac{3}{2} I_m^2(t) \right) dt. \quad (1.65)$$

Фазний струм резистивного КЗ у початковій схемі (дійсне значення) –

$$I_{SCph} = \frac{U_S}{\sqrt{2} R_S}. \quad (1.66)$$

Струм КЗ в еквівалентній схемі –

$$I_{SC} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \frac{U_S}{R_S}. \quad (1.67)$$

Потужності резистивного КЗ в початковій і еквівалентних схемах відповідно до (1.59), (1.66), (1.67) однакові:

$$P_{SC} = \frac{3U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_m}{\sqrt{2}R_S} = \frac{3}{2} \frac{U_m^2}{R_S}. \quad (1.68)$$

Коефіцієнт  $K_I$  визначається з (1.64), (1.67) або з (1.63), (1.66):

$$K_I = \frac{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} I_m(t) dt}{U_m / R_S}. \quad (1.69)$$



Для еквівалентної схеми трифазної СЕ залишаються значущими співвідношення (1.33), (1.38), що впливає з (1.64), (1.65), (1.68), (1.69).

Таким чином, СЕ постійного струму й трифазна симетрична система змінного струму при винятково активному навантаженні еквівалентні за втратами і ККД. Щоб оцінити роботу трифазної системи змінного струму, можна використати дані таблиць 1.3–1.5, криві на рисунку 1.7 і співвідношення (1.38), (1.50), (1.57). Залежності реального середнього значення ККД від відносної амплітуди пульсацій активної потужності або пульсацій струму навантаження наведено в таблицях 1.4 і 1.5. Щоб можна було використовувати дані таблиць потрібно знати графік реальної змінної складової активної потужності або струму навантаження, який апроксимується еквівалентною синусоїдою з врахуванням співвідношення (1.57). Зазначимо, що втрата ККД визначається за амплітудою пульсації активної потужності і не залежить від частоти пульсацій.

### 1.2.3 Перевірка співвідношень, отриманих для СЕ постійної напруги

Схему експерименту в СЕ постійної напруги зображено на рисунку 1.11.

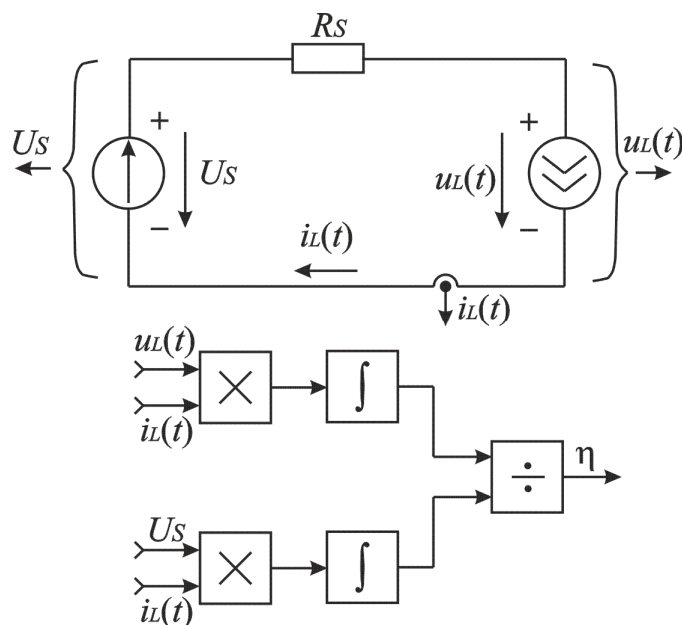


Рисунок 1.11 – Схема експерименту в СЕ постійної напруги

Приймемо такі параметри схеми:

– постійна напруга джерела  $U_S = 100 \text{ В}$ ;

- корисний струм навантаження  $I_{usf} = 100$  А;
- миттєвий струм навантаження

$$\begin{aligned} i_L &= I_{usf} + \Delta_I \sin \vartheta, \\ i_L &= 100 + 100 \sin \vartheta, \end{aligned} \quad (1.70)$$

де  $0 \leq \Delta_I \leq 1$ ,  $\vartheta = 2\pi ft$ ,  $f$  – частота пульсацій струму навантаження, Гц;  
 $t$  – час, с. Приймаємо  $f = 1$  Гц;

- потужність резистивного КЗ

$$P_{SC} = \frac{U_S^2}{R_S}; \quad (1.71)$$

- струм резистивного КЗ

$$I_{SC} = \frac{U_S}{R_S}; \quad (1.72)$$

- безрозмірний коефіцієнт

$$K_I = \frac{I_{usf}}{U_S} R_S. \quad (1.73)$$

Алгоритм експерименту:

1. Задаємося шістнадцятьма значеннями коефіцієнта  $K_I$  відповідно до другого рядка таблиці 1.3 і, відповідно, шістнадцятьма значеннями  $R_S$ .
2. Для кожного з шістнадцяти значень  $R_S$  при  $\Delta_I = 0$  запускаємо модель і зчитуємо значення  $\eta_{\max}$ .
3. Задаємося шістнадцятьма значеннями коефіцієнта  $K_I$  відповідно до другого рядка таблиці 1.4.
4. Задавши значеннями  $\Delta_I$  за першим стовпцем таблиці 1.4, запускаємо модель на час, що дорівнює періоду повторюваності 1 секунда і зчитуємо 34 значень ККД,  $\eta = f(K_I, \Delta_I)$ .
5. Порівнюємо дані таблиць 1.3, 1.4 з даними експерименту.

На рисунку 1.12 наведено Matlab-модель експериментальної схеми відповідно до рисунка 1.11, а в таблиці 1.6 – результати віртуального експерименту.

Порівнявши дані таблиць 1.6, 1.3 і 1.4, можна зробити висновок, що відповідні теоретичні й експериментальні значення ККД фактично співпадають. Це свідчить про коректність прийнятих припущень і про придатність таблиць 1.3, 1.4 для практичних розрахунків ККД СЕ постійного струму.

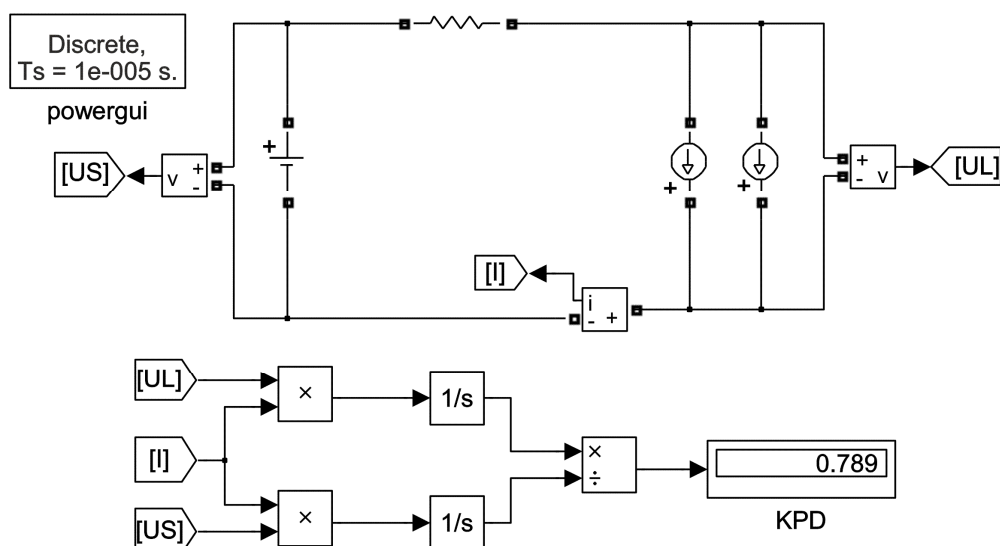


Рисунок 1.12 – Matlab-модель експериментальної схеми СЕ на постійному струмі

Таблиця 1.6 – Значення ККД СЕ постійної напруги, отримані під час віртуального експерименту

$k_{SC}$	4	6	8	10	12	14	15	16	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$\Delta_I/K_I$	0,5	0,211	0,146	0,113	0,092	0,077	0,072	0,067	0,059	0,052	0,042	0,034	0,026	0,02	0,017	0,014	0,01
0	0,5	0,789	0,854	0,887	0,908	0,923	0,928	0,933	0,941	0,948	0,958	0,966	0,974	0,98	0,983	0,986	0,99
0,1	0,498	0,788	0,853	0,886	0,908	0,923	0,928	0,933	0,941	0,948	0,958	0,966	0,974	0,98	0,983	0,986	0,99
0,25	0,485	0,783	0,849	0,884	0,905	0,921	0,926	0,931	0,939	0,946	0,957	0,965	0,973	0,979	0,983	0,986	0,99
0,5	0,438	0,763	0,836	0,873	0,897	0,913	0,919	0,925	0,934	0,942	0,953	0,962	0,971	0,978	0,981	0,984	0,989
0,75	0,359	0,73	0,813	0,855	0,882	0,901	0,908	0,914	0,924	0,933	0,946	0,956	0,967	0,974	0,978	0,982	0,987
1	0,25	0,684	0,781	0,831	0,862	0,885	0,892	0,9	0,912	0,922	0,937	0,949	0,961	0,97	0,975	0,979	0,985

#### 1.2.4 Перевірка співвідношень для трифазної симетричної системи електропостачання

На рисунку 1.13 наведено схему експерименту, де  $u_{sa}$ ,  $u_{sb}$ ,  $u_{sc}$  – джерела синусоїдальної напруги:

$$\begin{aligned}
 u_{sa} &= U_m \sin \vartheta, \\
 u_{sb} &= U_m \sin \left( \vartheta - \frac{2\pi}{3} \right), \\
 u_{sc} &= U_m \sin \left( \vartheta - \frac{4\pi}{3} \right),
 \end{aligned}
 \tag{1.74}$$

а  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$  – джерела синусоїдальних струмів

$$i_{sa} = I_m(t) \sin \vartheta,$$

$$i_{sb} = I_m(t) \sin \left( \vartheta - \frac{2\pi}{3} \right),$$

$$i_{sc} = I_m(t) \sin \left( \vartheta - \frac{4\pi}{3} \right),$$

$$I_m(t) = I_m (1 + \Delta_I \sin 2\pi t),$$
(1.75)

$$I_m(t) = I_m (1 + \Delta_I \sin 2\pi t),$$
(1.76)

$f_S = 50$  Гц.

Миттєва активна потужність навантаження

$$p_L = u_{La} i_{sa} + u_{Lb} i_{sb} + u_{Lc} i_{sc}.$$
(1.77)

Миттєва активна потужність джерела

$$p_S = u_{sa} i_{sa} + u_{sb} i_{sb} + u_{sc} i_{sc}.$$
(1.78)

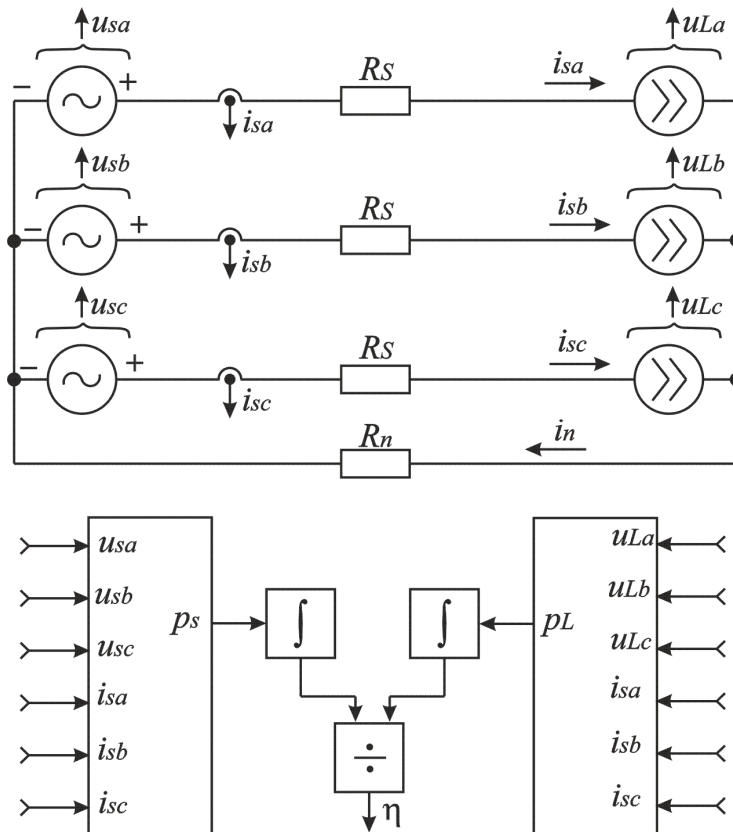


Рисунок 1.13 – Схема експерименту при змінному струмі

Алгоритм віртуального експерименту:

1. Задаємось значеннями параметрів схеми:  $U_m = 100$  В,  $I_m = 100$  А, а також  $K_I$  для кожної комірки таблиці 1.4.
2. Розраховуємо параметри значення  $R_S$  для обраного поєднання:

$$R_S = K_I \frac{U_m}{I_m}.$$
(1.79)

3. Запускаємо Matlab-модель СЕ на час, що дорівнює періоду повторюваності (1 с) і зчитуємо значення ККД.

4. Зіставляємо таблицю експериментальних ККД з аналітичною таблицею 1.4.

На рисунку 1.14 подано Matlab-модель, що відповідає схемі експерименту за рисунком 1.13. У таблиці 1.7 зведено результати експерименту.

Співставлення даних таблиць 1.4 і 1.7 доводить, що прийняті припущення справедливі, теоретичні (табл. 1.4 при  $\Delta_I = 0$ ) і експериментальні (табл. 1.7) результати співпадають.

Таблиця 1.7 – Значення ККД трифазної симетричної системи синусоїдальних напруг

$k_{SC}$	6	10	12	14	15	16	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$\Delta_I/K_I$	0,211	0,113	0,092	0,077	0,072	0,067	0,059	0,052	0,042	0,034	0,026	0,02	0,017	0,014	0,01
0	0,789	0,887	0,908	0,923	0,928	0,933	0,941	0,948	0,958	0,966	0,974	0,98	0,983	0,986	0,99
0,1	0,788	0,886	0,908	0,923	0,928	0,933	0,941	0,948	0,958	0,966	0,974	0,98	0,983	0,986	0,99
0,25	0,783	0,884	0,905	0,921	0,926	0,931	0,939	0,946	0,957	0,965	0,973	0,979	0,983	0,986	0,99
0,5	0,763	0,873	0,897	0,913	0,919	0,925	0,934	0,942	0,953	0,962	0,971	0,978	0,981	0,984	0,989
0,75	0,73	0,855	0,882	0,901	0,908	0,914	0,924	0,933	0,946	0,956	0,967	0,974	0,978	0,982	0,987
1	0,684	0,831	0,862	0,885	0,892	0,9	0,912	0,922	0,937	0,949	0,961	0,97	0,975	0,979	0,985

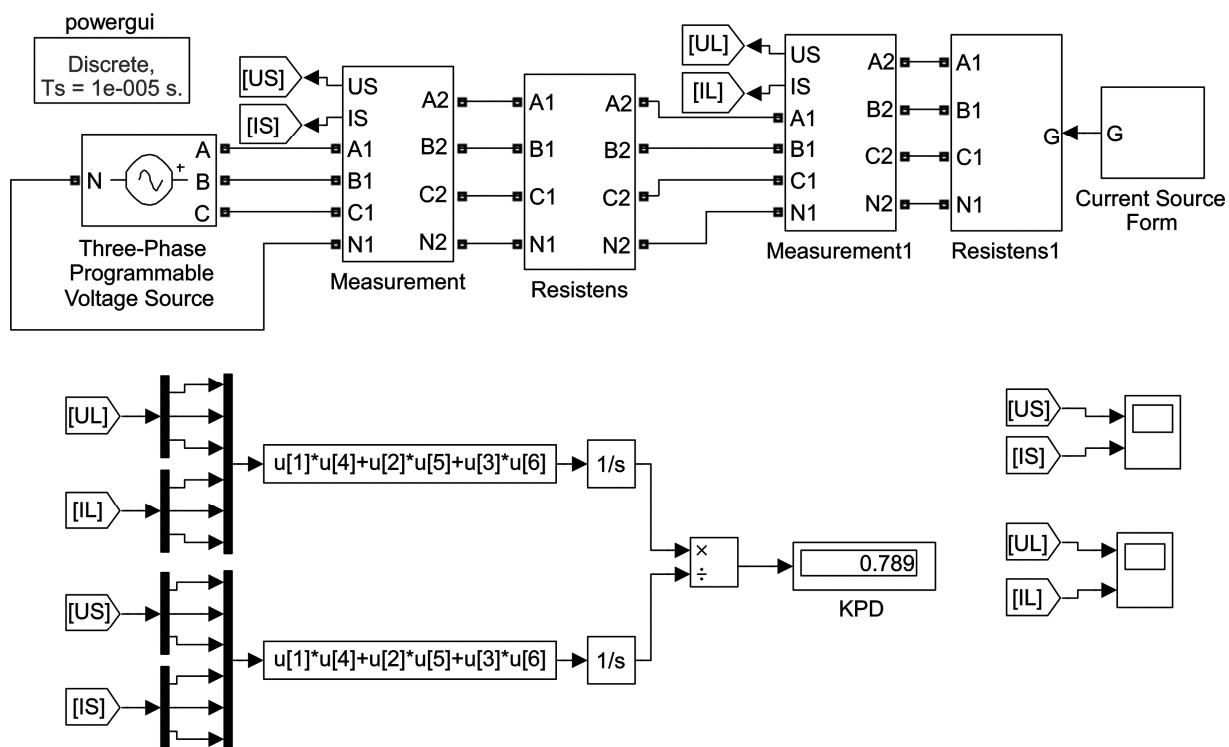


Рисунок 1.14 – Matlab-модель експериментальної схеми СЕ на змінному струмі

### 1.2.5 Розрахування ККД системи електропостачання з активним компенсатором

Розглянемо приклад використання отриманих в цьому підрозділі результатів для розрахування ККД СЕ з активним компенсатором, що складається з силового активного фільтра й накопичувача енергії [30; 35]. Схему такої СЕ наведено на рисунку 1.15.

У схемі СЕ паралельно до навантаження підімкнено активний компенсатор із ємнісним накопичувачем енергії, що забезпечує сталість миттєвої активної потужності джерела і, як наслідок, мінімальні втрати в резисторі лінії  $R_S$ .

Припустимо, що графік струму навантаження, його період повторюваності, середній за період повторюваності струм  $I_{usf}$ , а також середня за період повторюваності активна потужність навантаження  $P_{usf}$  відомі.

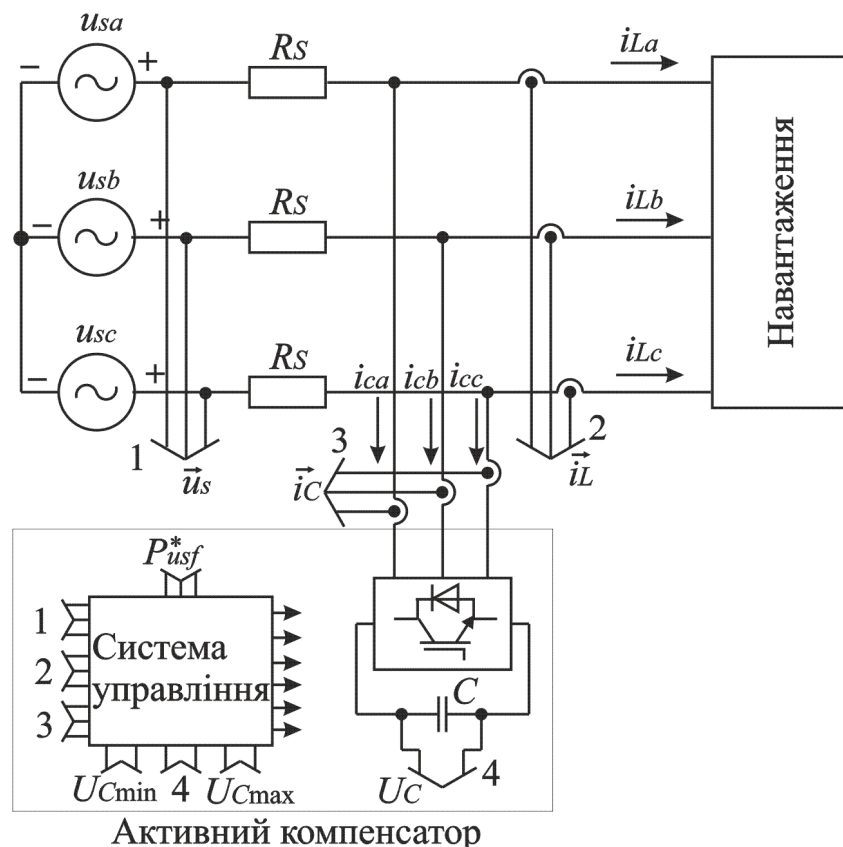


Рисунок 1.15 – Система електропостачання з активним компенсатором

За графіком струму навантаження або миттєвої активної потужності навантаження визначимо відносне значення змінної складової струму навантаження  $\Delta_I$ .

Знаючи параметри  $\Delta_I$  і  $K_I = I_{usf}/I_{SC}$ , із таблиці 1.5 визначимо втрати ККД.

За методикою, представленою в [35], визначимо відносні втрати енергії в активному компенсаторі.

Застосовувати активний компенсатор у схемі електропостачання доцільно, якщо відносне зменшення ККД СЕ, обумовлене втратами в активному компенсаторі, нижче ніж втрати ККД відповідно до таблиці 1.5.

ККД СЕ з підімкненим паралельно до навантаження активним компенсатором дорівнює різниці максимального ККД  $\eta_{\max}$  відповідно до таблиці 1.5 і значення зменшення ККД  $\Delta\eta$ :

$$\eta_{CE} = \eta_{\max} - \Delta\eta. \quad (1.80)$$

У разі, якщо графік струму навантаження в еквівалентній схемі недостатньо апроксимується однією або декількома синусоїдами, точні розрахунки ККД СЕ можна виконати, використавши Matlab-модель СЕ.

### **1.3 Коефіцієнт корисної дії системи електропостачання однофазної змінної напруги прямокутної й синусоїдальної форм**

Сумарні втрати електроенергії в елементах систем електропостачання – генераторах, кабельних та повітряних лініях, трансформаторах, реакторах, напівпровідникових перетворювачах, компенсаторах, накопичувачах енергії, комутуючих апаратах – можуть перевищувати 10–15 % електроенергії, що виробляється, до того ж основна частка втрат припадає на кабелі, повітряні лінії, трансформатори й реактори [72]. Оскільки у світі в електричному вигляді транспортується й передається більше половини всієї споживаної енергії, підвищення коефіцієнта корисної дії систем електропостачання навіть на один відсоток дає змогу зекономити значні матеріальні ресурси. Більша частина електричної енергії передається від джерела до навантаження за допомогою трифазних симетричних систем синусоїдальної напруги, менша частина (декілька відсотків) – за допомогою СЕ постійної напруги. У роботі [80] запропоновано СЕ однофазної змінної напруги прямокутної форми для залізничного транспорту. Перевагою такої системи, на думку авторів [80], може бути зменшення відношення амплітуди напруги джерела до його діючого значення і, як наслідок, здешевлення ізоляції кабелів і трансформаторів. Однофазні СЕ синусоїдальної напруги здебільшого застосовуються в разі підімкнення навантаження до

автономного джерела – вітрогенератора або дизель-генератора відносно невеликої потужності. Комунальні системи електропостачання житлових будинків, офісів, суспільно-адміністративних будівель, невеликих підприємств, міського електротранспорту, в яких джерелом енергії є трифазна промислова мережа змінної синусоїдальної напруги, за своєю структурою є трифазними з багатьма однофазними споживачами, нерівномірно розподіленими між трьома фазами промислової мережі.

Середній для заданого інтервалу часу коефіцієнт корисної дії СЕ, що визначається за відношенням кількості енергії, що надійшла до навантаження, до енергії, що віддало джерело, залежить від омічного опору лінії й діючого значення струму в ній  $i$ , відповідно, від форми графіка миттєвої активної потужності. Максимального ККД СЕ досягають за умови виконання двох вимог:

1) енергія передається від джерела до навантаження з постійною швидкістю, тобто у разі постійного значення миттєвої активної потужності;

2) відсутній двоспрямований обмін енергією між двома елементами СЕ, тобто форма струму джерела співпадає з формою напруги джерела.

Розглянемо методи визначення максимально можливого й реального ККД систем електропостачання двох типів:

1) однофазної змінної напруги прямокутної форми;

2) однофазної змінної напруги синусоїдальної форми.

Уведено параметр «втрати ККД», який визначається як різниця між максимально можливим і реальним ККД СЕ.

### 1.3.1 Система електропостачання однофазної змінної напруги прямокутної форми

Коефіцієнт корисної дії системи СЕ однофазної змінної напруги прямокутної форми залежить від форми струму навантаження. Якщо наруга синусоїдальна й струм навантаження має прямокутну форму, то СЕ однофазної змінної напруги прямокутної форми еквівалентна системі електропостачання постійної напруги (рис. 1.7).

Відповідно, співвідношення, графіки залежності й таблиці, отримані в [26] при аналізі СЕ постійної напруги, залишаються справедливими і для СЕ прямокутної постійної напруги.



Розглянемо режим роботи СЕ з синусоїдальним струмом навантаження, що відстає за фазою від напруги джерела, проілюстрований на рисунку 1.16.

Відповідно до рисунка 1.16,

$$\begin{aligned} u_s &= U_m, \text{ if } 2\pi(n-1) \leq \vartheta \leq \pi(2n-1), \\ u_s &= -U_m, \text{ if } \pi(2n-1) \leq \vartheta \leq 2\pi n, \end{aligned} \quad (1.81)$$

де  $u_s$  – миттєва напруга джерела;  $U_m$  – амплітуда напруги джерела;  $n = 1, 2, 3, \dots$  – натуральний ряд чисел;  $\vartheta = 2\pi t / T$ ;  $T$  – період повторюваності;  $t$  – час.

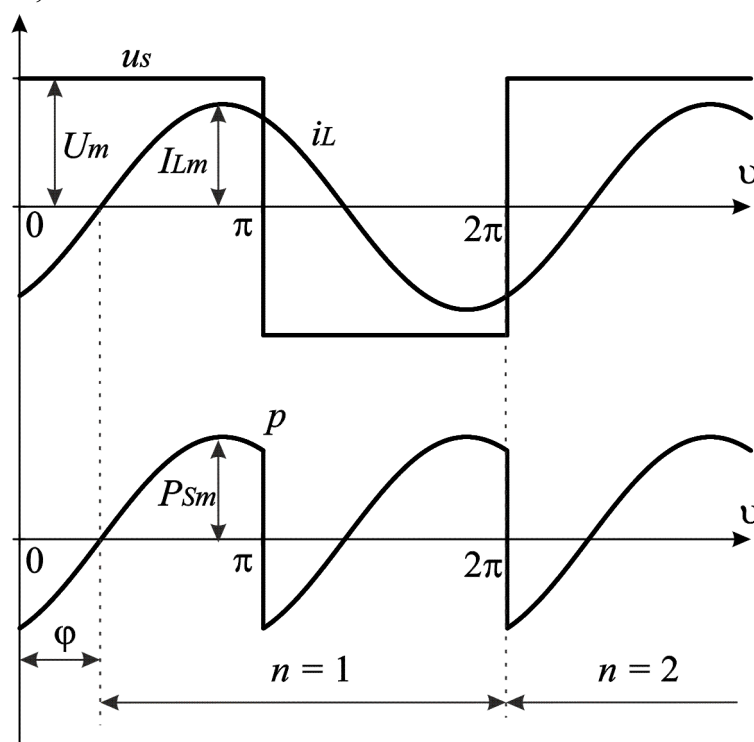


Рисунок 1.16 – Напруга джерела, струм навантаження й миттєва реактивна потужність СЕ змінної напруги прямокутної форми

$$i_L = I_{Lm} \sin(\vartheta - \varphi), \quad (1.82)$$

де  $\varphi$  – кут зсуву струму навантаження відносної напруги джерела;

$$p_s = \text{sign}(u_s) U_m I_{Lm} \sin(\vartheta - \varphi). \quad (1.83)$$

Крива миттєвої активної потужності на рисунку 1.16 свідчить про двоспрямований потік енергії між джерелом і навантаженням.

Уведемо поняття «корисний струм навантаження»,  $I_{usf}$ , за якого енергія надходить у навантаження з постійною середньою швидкістю, що дорівнює  $P_{usf}$ , і поняття струму резистивного КЗ системи електропостачання (1.72).

Корисний струм в періоді повторюваності відповідно до рисунку 1.16 –

$$I_{usf} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_{Lm} \sin(\vartheta - \varphi) d\vartheta = \frac{2}{\pi} I_{Lm} \cos \varphi. \quad (1.84)$$

Середня активна потужність джерела –

$$P_S = \frac{2}{\pi} U_S I_{Lm} \cos \varphi. \quad (1.85)$$

Середня потужність втрат за період повторюваності –

$$\Delta P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} R_S I_{Lm}^2 \sin^2 \vartheta d\vartheta = \frac{1}{2} R_S I_{Lm}^2. \quad (1.86)$$

Беручи до уваги (1.32), (1.85), (1.86), визначимо середнє значення ККД за період повторюваності:

$$\eta_{AVreal} = \frac{P_S - \Delta P}{P_S} = 1 - \frac{\pi \cdot I_{Lm}}{4 I_{SC} \cos \varphi} = 1 - \frac{\pi^2 \cdot K_I}{8 \cos^2 \varphi} = 1 - 1,2337 \frac{K_I}{\cos^2 \varphi}. \quad (1.87)$$

Режим роботи СЕ характеризується відношенням потужності резистивного КЗ (1.71) до корисної потужності навантаження (1.29). До того ж  $k_{SC} \geq 4$ .

Розраховані за співвідношенням (1.87) значення залежності реального ККД від відношення  $k_{SC}$  і кута зсуву синусоїдального струму відносно прямокутної напруги  $\varphi$  наведено в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Теоретичні реальні значення ККД трифазної СЕ симетричних синусоїдальних напруг за  $\Delta_I = 0$

$k_{SC}$	6	10	12	14	15	16	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$\varphi \backslash K_I$	0,211	0,113	0,092	0,077	0,072	0,067	0,059	0,052	0,042	0,034	0,026	0,020	0,017	0,014	0,010
$\eta_{max}$	0,789	0,887	0,908	0,923	0,928	0,933	0,941	0,947	0,958	0,965	0,974	0,98	0,983	0,986	0,99
$\eta_{AVreal}^0$	0,740	0,861	0,886	0,905	0,911	0,917	0,927	0,935	0,948	0,957	0,968	0,975	0,979	0,983	0,988
$\eta_{AVreal}^{\pi/12}$	0,721	0,851	0,878	0,898	0,905	0,911	0,922	0,930	0,944	0,954	0,966	0,974	0,978	0,981	0,987
$\eta_{AVreal}^{\pi/6}$	0,653	0,814	0,849	0,873	0,882	0,890	0,903	0,913	0,931	0,942	0,957	0,967	0,972	0,977	0,984
$\eta_{AVreal}^{\pi/4}$	0,480	0,721	0,773	0,810	0,822	0,835	0,854	0,869	0,896	0,914	0,936	0,951	0,958	0,965	0,975
$\eta_{AVreal}^{\pi/3}$	0,041	0,442	0,546	0,620	0,645	0,669	0,709	0,738	0,793	0,827	0,872	0,901	0,916	0,931	0,951
$\eta_{AVreal}^{5\pi/12}$	–	–	–	–	–	–	–	0,024	0,226	0,355	0,479	0,632	0,687	0,742	0,816

У другому 1 третьому рядках таблиці 1.8 для зручності її використання наведено значення коефіцієнта  $K_I$  і максимально можливого ККД СЕ відповідно, що співпадають з аналогічними значеннями таблиці 1.3, розрахованими за співвідношеннями (1.33), (1.38).

Аналіз даних таблиці 1.8 доводить, що в разі прямокутної форми напруги джерела і синусоїдальної форми струму втрата ККД при  $\varphi = \pi/6$  може становити декілька відсотків, тому СЕ змінної напруги прямокутної форми навряд чи може мати небудь-які перспективи для практичної реалізації.

### 1.3.2 Система електропостачання однофазної синусоїдальної напруги

Теоретичний інтерес становить оцінка однофазної автономної СЕ та її порівняння з трифазною. Зокрема, потрібно відповісти на запитання: чому коефіцієнт потужності однофазної розглядуваної системи, яка розглядається як окремий випадок трифазної системи, не може перевищувати  $1/\sqrt{2}$  [28].

Практичний інтерес становить можливість застосування результатів, отриманих для СЕ однофазної напруги прямокутної форми, щодо однофазних СЕ синусоїдальної напруги.

Еквівалентну схему СЕ з синусоїдальними напругами джерела з лінійним резистивним навантаженням наведено на рисунку 1.17.

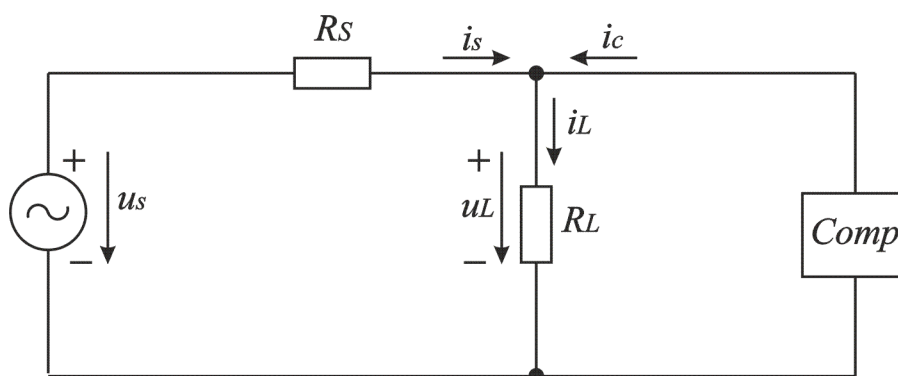


Рисунок 1.17 – Еквівалентна схема СЕ однофазної синусоїдальної напруги

На рисунку 1.17  $u_s$  – джерело синусоїдальної напруги з частотою  $f_s$ ;  $R_L$  – опір лінійного резистора;  $u_L$  – напруга на навантаженні;  $i_s$ ,  $i_L$ ,  $i_c$  – миттєві струми джерела, навантаження й компенсатора відповідно.

Компенсатор становить джерело змінного струму з частотою  $f_s$ .

Вважатимемо, що період повторюваності процесів у схемі дорівнює періоду повторюваності синусоїдальної напруги джерела.

Розглянемо два режими роботи схеми на рисунку 1.17:

- робота за сталої миттєвої активної потужності навантаження;
- робота з максимально можливим середнім ККД за період повторюваності.

Перший режим можна застосувати в СЕ прецензійної нагрівальної установки з низьким допустимим рівнем пульсації температури нагрівального елемента.

Оцінивши характеристики другого режиму, можна буде відповісти на запитання: чи є значення середнього ККД за період повторюваності, що дорівнює  $\eta = R_L / (R_L + R_S)$ , максимально можливим, чи за допомогою компенсатора з близькими до нуля внутрішніми втратами енергії можна підвищити ККД СЕ.

Докладно зрозглянемо режим сталої миттєвої активної потужності навантаження. Співвідношення для СЕ (рис. 1.18) буде таким:

$$u_S = U_m \sin \vartheta, \quad (1.88)$$

де  $\vartheta = 2\pi f_s t$ .

Сталість миттєвої активної потужності навантаження можна отримати тільки за умови, що форма напруги на навантаженні – меандр з частотою, що дорівнює частоті джерела:

$$u_L = U_L \text{sign}(u_S), \quad (1.89)$$

де  $U_L$  – амплітуда меандру.

Миттєвий струм навантаження –

$$i_L = i_S + i_C. \quad (1.90)$$

Струм джерела –

$$i_S = \frac{u_S - u_L}{R_S}. \quad (1.91)$$

З урахуванням (1.89)

$$i_L = \frac{U_L}{R_L} \text{sign}(u_S). \quad (1.92)$$

Криві напруг і струмів за співвідношеннями (1.89) – (1.92) різняться симетрією третього роду і залежно від вибору початку координат можуть бути парними або непарними функціями часу. Отже, інтегральні значення напруг і струмів можна розрахувати в інтервалі  $[0, \pi/2]$  або  $[0, \pi]$ , спростивши співвідношення (1.89), (1.91), (1.92):

$$u_L = U_L = \text{const}, \quad (1.93)$$

$$i_s = \frac{U_m \sin \vartheta - U_L}{R_s}, \quad (1.94)$$

$$i_L = I_L = \frac{U_L}{R_L} = \text{const}. \quad (1.95)$$

Миттєві активні потужності в елементах системи визначаються за наступними співвідношеннями:

1. Миттєва активна потужність джерела відповідно до (1.89), (1.94):

$$p_s = u_s i_s = \frac{U_m^2}{R_s} \sin^2 \vartheta - \frac{U_m U_L}{R_s} \sin \vartheta. \quad (1.96)$$

2. Миттєва активна потужність навантаження з урахуванням (1.93):

$$p_L = u_s i_s = \frac{U_L^2}{R_L} = P_L = \text{const}. \quad (1.97)$$

3. Миттєва активна потужність втрат:

$$\Delta p = R_s i_s^2. \quad (1.98)$$

4. Миттєва активна потужність компенсатора:

$$p_C = U_L i_C. \quad (1.99)$$

За принципом дії компенсатора середня активна потужність за період повторюваності в ньому в разі відсутності внутрішніх втрат енергії дорівнює нулю, тому

$$P_s = P_L + R_s I_{SRMS}^2, \quad (1.100)$$

де  $I_{SRMS}$  – діюче значення струму джерела, обчислене в періоді повторюваності.

Інтегруючи співвідношення (1.96), отримаємо:

$$P_s = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left( \frac{U_m^2}{R_s} \sin^2 \vartheta - \frac{U_m U_L}{R_s} \sin \vartheta \right) d\vartheta = \frac{U_m^2}{2R_s} - \frac{2U_m U_L}{\pi R_s}. \quad (1.101)$$

Із (1.94), (1.98):

$$I_{SRMS}^2 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left( \frac{U_m^2 \sin^2 \vartheta - U_L}{R_s} - \frac{2U_m U_L}{\pi R_s} \right)^2 d\vartheta = \frac{U_m^2}{2R_s^2} - \frac{4U_m U_L}{\pi R_s^2} + \frac{U_L^2}{R_s^2}. \quad (1.102)$$

Підставивши в (1.100) співвідношення (1.97), (1.101) і (1.102), отримаємо:

$$\frac{U_m^2}{2R_s} - \frac{2U_m U_L}{\pi R_s} = \frac{U_L^2}{R_L} + \frac{U_m^2}{2R_s^2} - \frac{4U_m U_L}{\pi R_s^2} + \frac{U_L^2}{R_s^2}, \quad (1.103)$$

або

$$\frac{2U_m}{\pi R_s} = \frac{U_L}{R_L} + \frac{U_L}{R_s}. \quad (1.104)$$

Із (1.104):

$$U_m = \frac{\pi}{2} \frac{R_L + R_S}{R_L} U_L. \quad (1.105)$$

Співвідношення (1.105) є умовою нульового значення середньої активної потужності компенсатора.

Для прикладу побудуємо графіки напруг і струмів розглядуваної схеми при таких її параметрах:  $R_L = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_S = 10 \text{ Ом}$ ,  $U_L = 200 \text{ В}$ .

За (1.105), (1.94), (1.95) отримаємо:  $U_m = 345,576 \text{ В}$ ,  $I_{Sm} = 14,558 \text{ А}$ ,  $I_L = 2 \text{ А}$ .

На рисунку 1.18 подано криві напруг і струмів схеми в режимі сталості активної потужності навантаження. Як зрозуміло з рисунка 1.18, умови  $P_C = 0$  і  $p_L = \text{const}$  виконуються. Не важко довести, що умова  $p_L = \text{const}$  відповідно до рисунка 1.17 виконується в СЕ внаслідок зменшення швидкості передачі енергії до навантаження й різкого зниження ККД. Дійсно, при значеннях параметрів, обраних для прикладу, у схемі (відповідно рисунка 1.17) без компенсатора  $p_L = \text{var}$ ,  $P_L = 493,483 \text{ Вт}$ ,  $P_S = 542,831 \text{ Вт}$ ,  $\Delta P = 49,348 \text{ Вт}$ ,  $\eta = 0,9091$ ; а в схемі з компенсатором –  $p_L = P_L = \text{const}$ ,  $P_L = 400 \text{ Вт}$ ,  $P_S = 1\,571,139 \text{ Вт}$ ,  $\Delta P = 1\,171,14 \text{ Вт}$ ,  $\eta = 0,255$ .

Низький ККД у схемі з компенсатором свідчить про недоцільність її практичного застосування. Сталість модуля миттєвої активної потужності навантаження при високому ККД СЕ можна отримати в схемі, наведеній на рисунку 1.19.

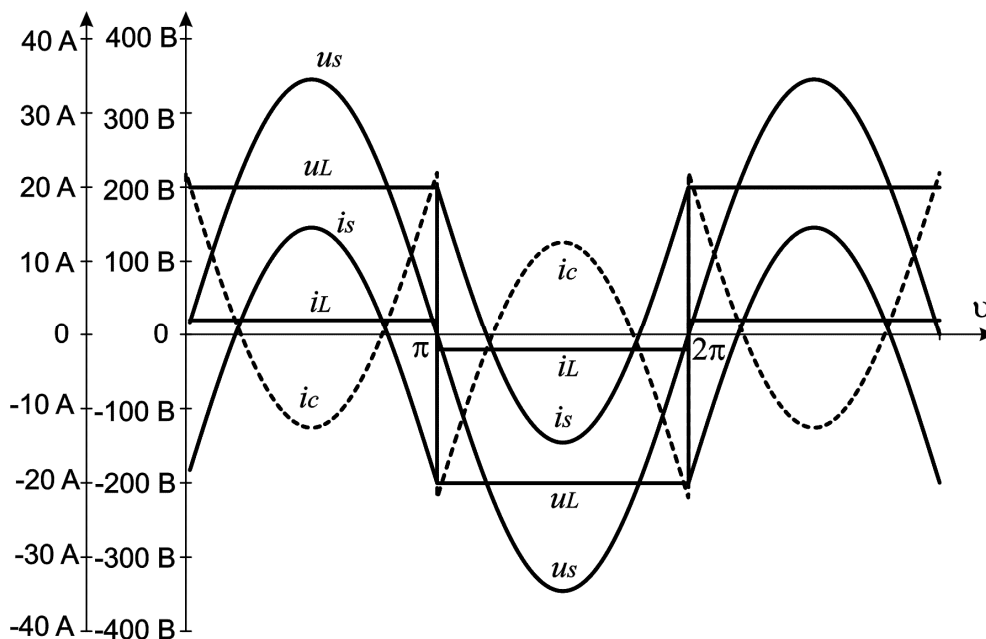


Рисунок 1.18 – Криві напруг і струмів у схемі при роботі в режимі сталості миттєвої активної потужності

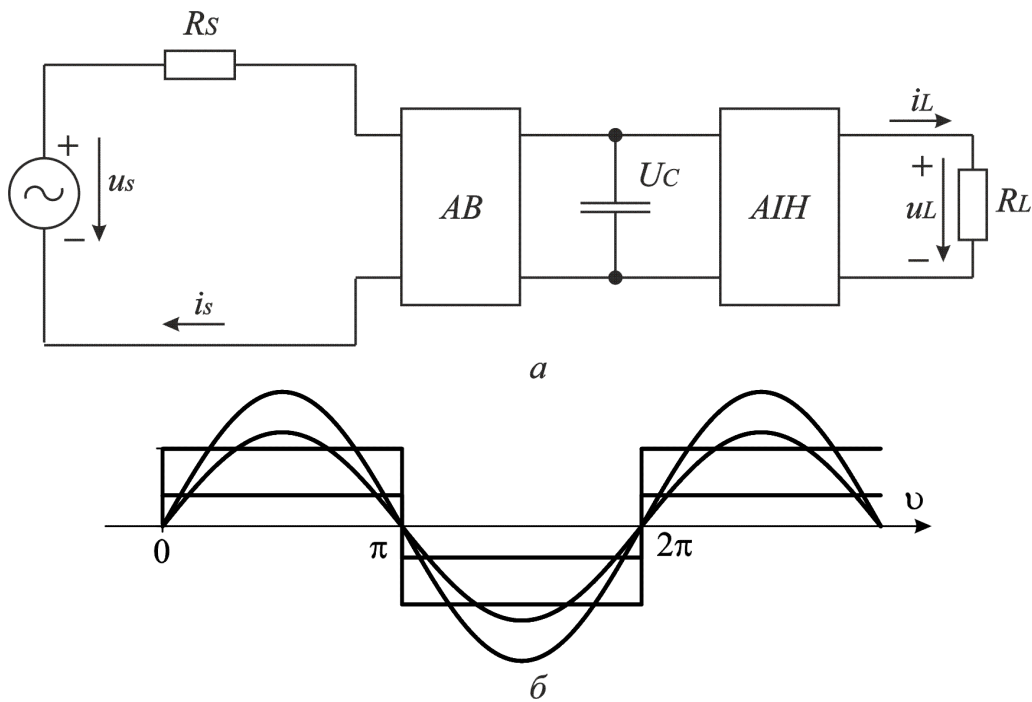


Рисунок 1.19 – Схема СЕ з постійним модулем миттєвої активної потужності навантаження (а) і криві напруги й струму мережі та навантаження (б)

Активний випрямляч (АВ) забезпечує сталість напруги  $U_d$  на вході автономного інвертора напруги (АІН), а також синусоїдальну форму струму мережі  $i_s$  і його співпадіння за фазою з напругою мережі. На виході АІН забезпечує сталість миттєвої активної потужності.

### 1.3.3 Система електропостачання синусоїдальної напруги в режимі максимально можливого ККД

Розглянемо роботу схеми, поданої на рисунку 1.17, в режимі максимально можливого ККД.

При відімкненому компенсаторі струм джерела

$$i_s = \frac{U_m}{R_L + R_s} \sin \vartheta, \quad (1.106)$$

а ККД СЕ

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R_s}. \quad (1.107)$$

Чи можна застосовувати режим роботи схеми з підімкненим компенсатором, за якого ККД буде більшим, ніж розрахований за (1.107)?

У попередньому підрозділі доведено, що вирівнювання графіка миттєвої активної потужності за допомогою компенсатора призводить до

різкого зменшення ККД порівняно з (1.107). Обґрунтованим видається використання режиму, в якому компенсатор забезпечує сталість у періоді повторюваності модуля струму мережі прямокутної форми.

Визначимо середню активну потужність навантаження як корисну

$$P_{LAV} = P_{usf} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_L u_L d\vartheta \quad (1.108)$$

і розглянемо два обмеження:

– середня потужність компенсатора за період повторюваності дорівнює нулю,  $P_C = 0$ ;

– корисна потужність навантаження в схемі без компенсатора й корисна потужність навантаження в режимі роботи за незмінного струму джерела однакові,  $P_{LAV} = P_{AVcomp} = P_{usf}$ .

Базові співвідношення в режимі роботи  $i_S = \text{const}$  – (1.88), (1.90), (1.91),

$$i_S = I_S = \text{const}, \quad (1.109)$$

$$p_S = u_S i_S = U_m I_S \sin \vartheta. \quad (1.110)$$

Середня за період повторюваності активна потужність джерела –

$$P_S = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_m I_S \sin \vartheta d\vartheta = \frac{2}{\pi} U_m I_S. \quad (1.111)$$

Миттєва й середня потужність втрат –

$$\Delta p = \Delta P = R_S I_S^2. \quad (1.112)$$

Із (1.91) напруга на навантаженні –

$$u_L = u_S - i_S R_S = U_m \sin \vartheta - R_S I_S, \quad (1.113)$$

а струм навантаження –

$$i_L = \frac{U_m \sin \vartheta - R_S I_S}{R_L}. \quad (1.114)$$

Із (1.90), (1.114):

$$i_C = i_L - I_S = \frac{U_m \sin \vartheta - R_S I_S}{R_L} - I_S. \quad (1.115)$$

Миттєву активну потужність компенсатора знайдемо за (1.113), (1.115):

$$\begin{aligned} p_C = u_L i_C &= (U_m \sin \vartheta - I_S R_S) \cdot \left( \frac{U_m \sin \vartheta - R_S I_S}{R_L} - I_S \right) = \\ &= \frac{U_m^2}{R_L} \sin^2 \vartheta - 2 \frac{R_S}{R_L} U_m I_S \sin \vartheta - U_m I_S \sin \vartheta + R_S \left( 1 + \frac{R_S}{R_L} \right) I_S^2. \end{aligned} \quad (1.116)$$



Після інтегрування (1.116) в періоді повторюваності отримаємо:

$$P_C = \frac{U_m^2}{2R_L} - \frac{4R_S}{\pi R_L} U_m I_S - \frac{2}{\pi} U_m I_S + R_S \left(1 + \frac{R_S}{R_L}\right) I_S^2. \quad (1.117)$$

За умови, що  $P_C = 0$ , задавшись значеннями  $R_S$ ,  $R_L$ ,  $U_m$  за попереднім розділом, знайдемо значення струму джерела з (1.117):

$$I_{S1} = \frac{\frac{2}{\pi} \left(1 + 2 \frac{R_S}{R_L}\right) U_m \pm \sqrt{\frac{4}{\pi^2} \left(1 + 2 \frac{R_S}{R_L}\right)^2 U_m^2 - 2 \frac{R_S}{R_L} \left(1 + 2 \frac{R_S}{R_L}\right) U_m^2}}{2R_S \left(1 + \frac{R_S}{R_L}\right)}, \quad (1.118)$$

$$I_{S1} = 2,52805 \text{ A.}$$

При заданих параметрах схеми в режимі роботи без компенсатора середня активна потужність навантаження становить 493,483 Вт. Середня активна потужність навантаження в схемі з компенсатором –

$$P_L = P_S - R_S I_S^2. \quad (1.119)$$

Підставивши в (1.119) значення  $P_L = 493,483$  Вт, із урахуванням (1.111) отримаємо:

$$493,483 = \frac{2}{\pi} U_m I_{S2} - R_S I_S^2. \quad (1.120)$$

Розв'язавши квадратне рівняння (1.120), отримаємо значення струму джерела, за якого середня активна потужність навантаження в схемі без компенсатора й у схемі з компенсатором, що забезпечує прямокутну форму струму, однакові:  $I_{S2} = 2,52805 \text{ A}$ .

На рисунку 1.20 наведено графіки напруг і струмів, що ілюструють роботу схеми з компенсатором за прямокутної форми струму джерела. При  $v = 0, \pi, 2\pi, \dots$ , напруга на навантаженні змінюється стрибкоподібно.

Зазначимо, що значення прямокутних струмів джерела, які відповідають умові  $P_C = 0$  і умові рівності активних потужностей у разі відімкненого й підімкненого компенсатора  $P_L = P_{Lcomp}$ , відрізняються на 0,3 %, що на два порядки більше похибки розрахунків. Відповідно, при  $I_S = I_{S2}$  умова  $P_C = 0$  не виконується.

Розрахуємо середні за період повторюваності активну потужність і ККД СЕ при прийнятих раніше обмеженнях.

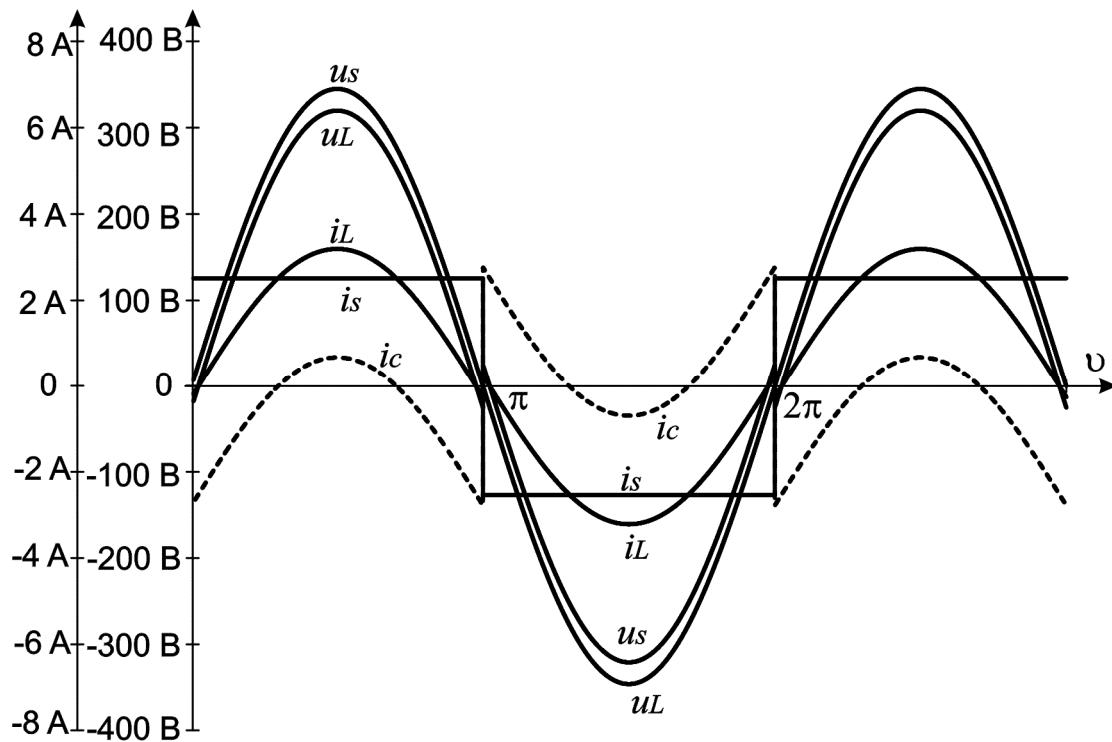


Рисунок 1.20 – Графіки напруг і струмів СЕ з компенсатором при прямокутній формі струму джерела

У разі прямокутної форми струму джерела,  $P_C = 0$  і прийнятих параметрах схеми фактичне значення  $P_C = 0,01 \text{ Вт}$ , що відповідає  $2 \cdot 10^{-5}$  від середньої потужності навантаження і є похибкою розрахунку. ККД при тих самих умовах і формі струму джерела

$$\eta_1 = 1 - \frac{\pi R_s I_s}{2U_m} = 0,8851. \quad (1.121)$$

За умови, що середня потужність навантаження в схемі без компенсатора й у схемі з компенсатором, який забезпечує прямокутну форму струму джерела, однакові, отримаємо значення середньої активної потужності компенсатора  $P_C = 1,58 \text{ Вт}$ , що на два порядки перевищує можливу похибку розрахунку.

Коефіцієнт корисної дії за умови рівності потужностей навантаження, із урахуванням прийнятих параметрів

$$\eta_2 = \frac{\frac{2}{\pi} U_m I_{s2} - R_s I_{s2}^2 + P_C}{\frac{2}{\pi} U_m I_{s2}} = 0,8876. \quad (1.122)$$

Отже, в системі електропостачання з однофазним синусоїдальним джерелом живлення й резистивним навантаженням підімкнення

паралельно до навантаження компенсатора, виконаного на базі силового активного фільтра, забезпечує сталість миттєвої активної потужності навантаження або миттєвого струму джерела, однак це супроводжується різким зниженням ККД схеми порівняно з ККД схеми без компенсатора, у якій  $\eta = R_L / (R_L + R_S)$ .

Умова максимуму ККД або мінімуму втрат у розглянутій схемі – однаковість форм напруги джерела й струму навантаження.

Схема електропостачання на рисунку 1.17, в якій компенсатор забезпечує прямокутну форму струму джерела, еквівалентна схемі з нелінійним навантаженням, наприклад із однофазним двонапівперіодним випрямлячем, до ланки постійного струму якого підімкнено реактор значної індуктивності. Для такої СЕ справедливими є співвідношення й таблиці, отримані для СЕ однофазної змінної напруги прямокутної форми, якщо напруга джерела синусоїдальна, а струм навантаження, що має прямокутну форму, зсунутий за фазою відносно напруги джерела на кут  $\varphi$ .

Наприклад, для СЕ з синусоїдальною напругою джерела амплітудою  $U_m = 345,576$  В,  $R_S = 10$  Ом і прямокутним струмом навантаження амплітудою  $I_{S2} = 2,53566$  А за  $P_L = P_{usf} = 493,483$  Вт потужність резистивного КЗ  $P_{SC} = U_m^2 / 2R_S = 5971,14$  Вт, а  $k_{SC} = 12,1$ .

За таблицею 1.8 (при  $k_{SC} = 12$ ) знайдемо максимальний ККД в схемі  $\eta_{\max} = 0,908$  і реальний ККД за  $\varphi = 0$   $\eta_{AVreal} = 0,886$ . Отримані табличні значення ККД фактично співпадають з ККД, розрахованими на початку прикладу за (1.107) –  $\eta_{\max} = 0,9091$  і  $\eta_{AVreal} = \eta_2 = 0,8876$ . Повне співпадіння значень ККД отримаємо після введення до таблиці 1.8 стовпця, де  $k_{SC} = 12,1$ .

### 1.3.4 Співставлення ККД трифазної і однофазної систем електропостачання

Як доведено в [28], коефіцієнт потужності в однофазній СЕ з синусоїдальними напругою і струмом, і з активним навантаженням, що розглядається як окремий випадок трифазної СЕ, не може бути більшим за  $1/\sqrt{2}$ , тоді як коефіцієнт потужності трифазної симетричної СЕ за тих самих умов дорівнює одиниці.

На рисунку 1.5 наведено трифазну трипровідну (а) і однофазну двопровідну (б) СЕ. Переходячи від миттєвих величин до інтегральних, позначимо:  $U_{ph3}$ ,  $U_{ph1}$  – діючі значення синусоїдальної напруги джерела в трифазній і в однофазній системах відповідно;  $I_{ph3}$ ,  $I_{ph1}$  – діючі значення

синусоїдального струму фази в трифазній і однофазній системах відповідно. Вважатимемо навантаження обох СЕ резистивним:  $Z_{Load3} = R_{L3}$ ,  $Z_{Load1} = R_{L1}$ .

Припустимо, що системи працюють у сталому режимі (1.14) з постійною потужністю за рівних фазних напруг мережі:

$$U_{ph} = U_{ph3} = U_{ph1}. \quad (1.123)$$

Приймемо також, що довжини ліній і щільності струмів  $\gamma$  у трифазній і однофазній системах однакові:

$$l = l_{cab3} = l_{cab1}, \quad (1.124)$$

$$\gamma = \gamma_3 = \gamma_1. \quad (1.125)$$

Оцінимо втрати енергії й витрати міді в розглядуваних СЕ. Оскільки

$$P = 3U_{ph}I_{ph3} = U_{ph}I_{ph1}, \quad (1.126)$$

із (1.126):

$$I_{ph3} = \frac{P}{3U_{ph}}, \quad (1.127)$$

$$I_{ph1} = \frac{P}{U_{ph}}. \quad (1.128)$$

Із (1.127) і (1.128)

$$I_{ph1} = 3I_{ph3}. \quad (1.129)$$

Площа поперечного розрізу провідників за щільністю струму  $\gamma$  –

$$S_3 = I_{ph3} / \gamma, \quad (1.130)$$

$$S_1 = 3I_{ph3} / \gamma. \quad (1.131)$$

Омічний опір провідника, що має довжину  $l$  –

$$R_{cab3} = \rho \frac{l}{S_3}, \quad (1.132)$$

$$R_{cab1} = \rho \frac{l}{S_1}. \quad (1.133)$$

Потужність втрат у лінії визначається за умовою (1.127), (1.128), (1.130) – (1.133):

$$\Delta P_3 = 3R_{cab3} I_{ph3}^2 = 3\rho l \gamma I_{ph3}, \quad (1.134)$$

$$\Delta P_1 = 2R_{cab1} I_{ph1}^2 = 6\rho l \gamma I_{ph3}. \quad (1.135)$$

Коефіцієнти 3 і 2 в (1.134), (1.135) враховують кількість провідників у лініях СЕ завдовжки  $l$ .

Витрати міді пропорційні за однакової щільності струму перерізу, довжини й кількості провідників у лінії. Беручи до уваги (1.130), (1.131),

$$\Delta M_3 = 3S_3 l = 3 \frac{II_{ph3}}{\gamma}, \quad (1.136)$$

$$\Delta M_1 = 2S_1 l = 6 \frac{II_{ph3}}{\gamma}. \quad (1.137)$$

Із співвідношень (1.134) – (1.137) випливає, що за однакових активних потужностей і за рівних діючих значень фазних напруг однофазна СЕ різниться в два рази більшими втратами електроенергії в провідниках і в два рази більшими витратами міді порівняно з трифазною СЕ.

Не важко довести, що зі збільшенням значення напруги однофазної СЕ в  $\sqrt{3}$  разів, тобто за умови, що фазна напруга однофазної СЕ дорівнює лінійній напрузі трифазної СЕ, втрати електроенергії й витрати міді в однофазній СЕ будуть в 1,16 разів більшими, ніж у трифазній.

Видається важливим оцінити економічну доцільність переведення побутових та інших однофазних споживачів на трифазне живлення з лінійною напругою 380 В. Можна припустити, що такий перехід є допустимим за умовами електробезпеки, оскільки в наш час житлові приміщення з електричними плитами живляться від трифазної мережі з номінальною напругою 380 В.

Збільшення втрат електроенергії і витрат міді під час переходу від трифазної СЕ до однофазної в два рази корелюється з низькими граничними значеннями коефіцієнта потужності однофазної системи –  $1/\sqrt{2}$ .

### 1.3.5 Перевірка співвідношень, отриманих для однофазної СЕ з прямокутною змінною напругою джерела

Схему віртуального експерименту наведено на рисунку 1.21.

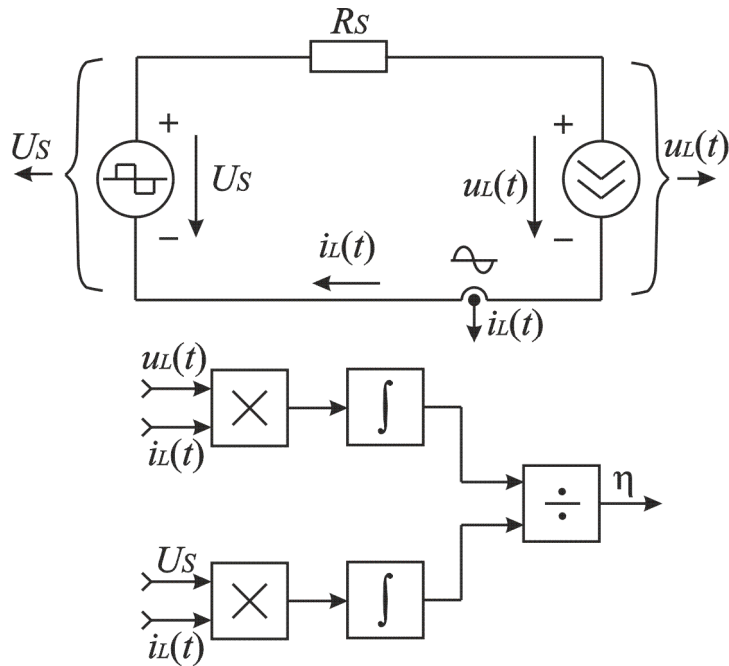


Рисунок 1.21 – Схема експерименту в СЕ зі змінною прямокутною напругою джерела

Напруга джерела  $u_s$  має прямокутну форму, струм навантаження – синусоїдальний і зсунутий у бік відставання на заданий кут  $\varphi$ . Прийmemo, що амплітуда напруги джерела дорівнює 100 В, а амплітуда синусоїдального струму навантаження  $I_{L\max} = 100$  А, оскільки ці величини можуть бути довільними.

Алгоритм експерименту:

1. Задаємо значеннями параметрів  $U_S$ ,  $I_{L\max}$ , а також  $K_I$ ,  $\cos\varphi$  відповідно до таблиці 1.8.
2. Визначаємо значення  $R_S$  за співвідношенням

$$R_S = \frac{K_I U_S \pi}{2 I_{L\max} \cos\varphi}. \quad (1.138)$$

і встановлюємо його в Matlab-моделі.

3. Запускаємо модель і зчитуємо значення ККД.
4. Послідовно задаючись поєднаннями параметрів відповідно до таблиці 1.8, розраховуємо експериментальні значення ККД.
5. Складаємо таблицю експериментальних ККД.

На рисунку 1.22 наведено Matlab-модель експериментальної схеми відповідно до рисунка 1.21, а в таблиці 1.9 – результати віртуального експерименту.

Співставлення таблиць 1.8 і 1.9 доводить, що прийняті припущення справедливі, а теоретичні (табл. 1.8) й експериментальні (табл. 1.9) результати співпадають.

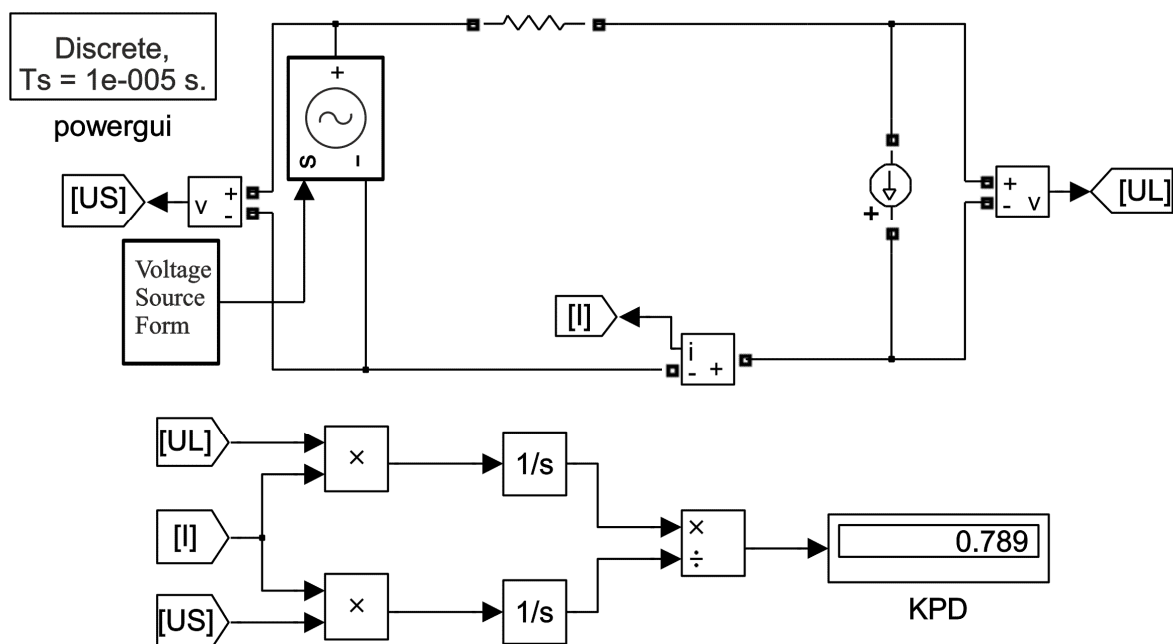


Рисунок 1.22 – Matlab-модель експериментальної схеми СЕ в разі прямокутної форми напруги джерела

Таблиця 1.9 – Експериментальні реальні значення ККД СЕ змінної напруги прямокутної форми

$k_{SC}$	6	10	12	14	15	16	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$\varphi K_I$	0,211	0,113	0,092	0,077	0,072	0,067	0,059	0,052	0,042	0,034	0,026	0,020	0,017	0,014	0,010
$\eta_{max}$	0,789	0,887	0,909	0,923	0,928	0,933	0,941	0,947	0,958	0,965	0,974	0,98	0,983	0,986	0,99
$\eta_{AVreal}^0$	0,740	0,860	0,886	0,905	0,911	0,918	0,927	0,935	0,948	0,957	0,968	0,976	0,979	0,983	0,987
$\eta_{AVreal}^{\pi/12}$	0,721	0,851	0,877	0,898	0,905	0,911	0,922	0,930	0,945	0,954	0,966	0,974	0,977	0,981	0,986
$\eta_{AVreal}^{\pi/6}$	0,654	0,813	0,849	0,873	0,881	0,890	0,903	0,913	0,931	0,942	0,957	0,967	0,972	0,977	0,983
$\eta_{AVreal}^{\pi/4}$	0,480	0,721	0,770	0,810	0,822	0,835	0,853	0,870	0,897	0,913	0,936	0,951	0,958	0,966	0,974
$\eta_{AVreal}^{\pi/3}$	—	0,441	0,541	0,620	0,645	0,670	0,708	0,739	0,793	0,827	0,871	0,903	0,915	0,931	0,950
$\eta_{AVreal}^{5\pi/12}$	—	—	—	—	—	—	—	0,025	0,226	0,353	0,520	0,636	0,684	0,742	0,812

## 1.4 Коефіцієнт корисної дії трифазної чотирипровідної системи електропостачання з асиметричним навантаженням

Втрати електричної енергії в системі електропостачання можуть досягати 10–15 % від значення енергії, що передається, до того ж базова частка втрат припадає на кабелі, повітряні лінії, трансформатори й реактори [72]. Значення втрат обумовлюється параметрами СЕ, значеннями й формою графіків активної й реактивної потужностей або формою графіків активного й реактивного струмів. Для кожної СЕ при заданому значенні середньої за період повторюваності активної потужності можливий максимальний коефіцієнт корисної дії. Реальний ККД завжди менший за розрахункове максимально можливе значення в наслідок відхилення від оптимальної форми графіка потужності або струму навантаження. Істотного збільшення реального ККД можна досягти шляхом підімкнення паралельно до навантаження силового активного фільтра з накопичувачем енергії, якщо втрати в САФ і накопичувачі значно менші, ніж різниця між реальними й максимально можливими втратами в СЕ. У цьому підрозділі на прикладі СЕ постійної напруги й трифазної СЕ синусоїдальних симетричних напруг з резистивним навантаженням продемонстровано новий підхід до оцінювання можливостей економії електроенергії в СЕ, що ґрунтується на розрахуванні її максимального й реального ККД із урахуванням втрат в САФ і накопичувачі енергії.

### 1.4.1 Еквівалентна схема трифазної СЕ

Схему трифазної СЕ синусоїдальних симетричних напруг із асиметричним навантаженням наведено на рисунку 1.23.

Амплітуду фазних напруг джерела, як і омичний опір лінії, приймаємо незмінними в часі (1.74).

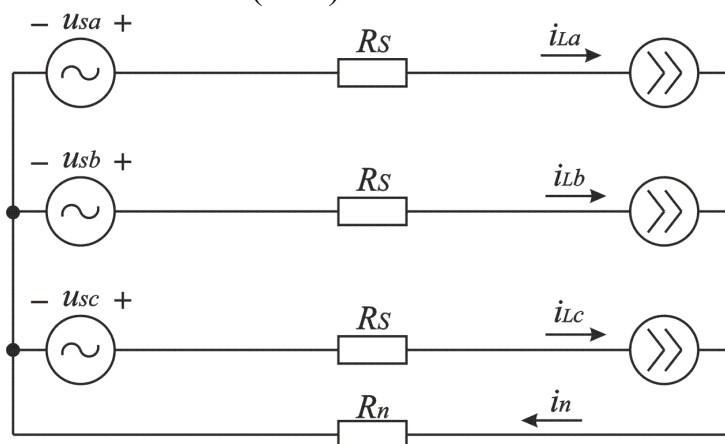


Рисунок 1.23 – Трифазна СЕ з симетричними синусоїдальними напругами



Амплітуди фазних струмів навантаження й кути зсуву струмів відносно фазних напруг загалом є функціями часу:

$$\begin{aligned} i_{sa} = i_{La} &= I_{ma}(t) \sin(\vartheta - \varphi_a(t)), \\ i_{sb} = i_{Lb} &= I_{mb}(t) \sin\left(\vartheta - \varphi_b(t) - \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (1.139)$$

$$\begin{aligned} i_{sc} = i_{Lc} &= I_{mc}(t) \sin\left(\vartheta - \varphi_c(t) - \frac{4\pi}{3}\right), \\ i_n &= i_{La} + i_{Lb} + i_{Lc}. \end{aligned} \quad (1.140)$$

Зазначимо, що зміну амплітуд фазних струмів, зазвичай, можна апроксимувати кривою, що повільно змінюється в часі порівняно з частотою мережі, припущення якої за інтервал часу, що дорівнює періоду напруги мережі живлення, є значно меншим за середнє значення амплітуди струму.

Розглянемо спочатку трифазну СЕ з симетричним активно-індуктивним навантаженням. Еквівалентну схему для цього випадку наведено на рисунку 1.24.

Постійна напруга джерела в еквівалентній схемі дорівнює модулю просторового вектора трифазної системи синусоїдальних напруг (1.59), активний струм  $i_{act}(t)$  дорівнює модулю проекції просторового вектора струму на просторовий вектор напруги, а реактивний струм  $i_{react}(t)$  – модулю проекції просторового вектора на вісь, перпендикулярну до вектора напруги й осі активного струму.

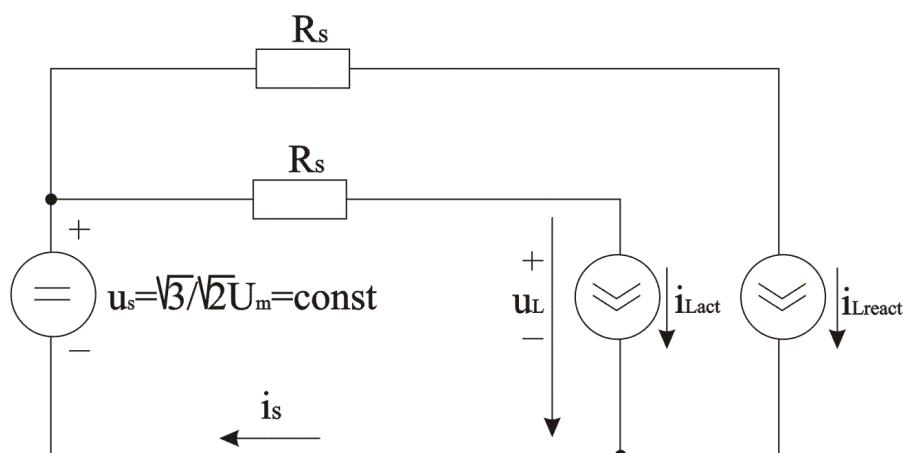


Рисунок 1.24 – Еквівалентна схема трифазної СЕ з активно-індуктивним симетричним навантаженням

Еквівалентну схему отримано за допущення, що фазні струми трифазної СЕ синусоїдальні і що реактивний струм не впливає на значення напруги на навантаженні  $u_L$ , оскільки, по-перше, виконується нерівність

$$i_r(t)R_s \ll U_s, \quad (1.141)$$

а, по-друге, кут між просторовими векторами напруги джерела й реактивного струму дорівнює  $\pi/2$ . Похибку зазначених припущень оцінено в [48].

Миттєві значення струмів в еквівалентній схемі визначають за формулами

$$i_{Lact}(t) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_m(t) \cos(\varphi(t)), \quad (1.142)$$

$$i_{Lreact}(t) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_m(t) \sin(\varphi(t)), \quad (1.143)$$

де амплітуда фазного синусоїдального струму  $I_m(t)$  і кут зсуву між просторовими векторами напруги й струму  $\varphi(t)$  є величинами, що повільно змінюються у часі.

Потужність трифазного резистивного короткого замикання в початковій і еквівалентній схемах визначаються аналогічно за співвідношенням (1.68).

Струм резистивного короткого замикання в еквівалентній схемі визначається за співвідношенням (1.67).

#### 1.4.2 Трифазна система електропостачання з симетричним навантаженням

Подамо корисну активну потужність навантаження, як середню активну потужність за період повторюваності процесів у системі електропостачання:

$$P_{usf} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left( \frac{3}{2} U_m I_m(t) \cos(\varphi(t)) - R_s \frac{3}{2} I_m^2(t) \right) dt, \quad (1.144)$$

а корисний струм, як середнє значення активного струму навантаження за період повторюваності:

$$I_{usf} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_m(t) \cos(\varphi(t)) dt. \quad (1.145)$$

При незмінних в часі значеннях  $U_m$  і  $\varphi$  за (1.68) і (1.145) одержимо:

$$k_{SC} = \frac{P_{SC}}{P_{usf}} = \frac{1}{K_I - \left( \frac{R_S I_m}{U_m} \right)^2}, \quad (1.146)$$

де

$$I_m = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} I_m(t) dt - \quad (1.147)$$

середнє значення модуля фазного струму,

$$K_I = \frac{I_m R_S \cos \varphi}{U_m} = \frac{I_{usf}}{I_{SC}} - \quad (1.148)$$

коефіцієнт, що дорівнює відношенню корисного струму, за якого енергія надходить до навантаження з постійною швидкістю  $P_{usf}$  до струму резистивного КЗ. Коефіцієнти  $K_I$  та  $k_{SC}$  зв'язані співвідношенням (1.33), що накладає обмеження  $k_{SC} \geq 4$ .

Струм навантаження  $i_L$  еквівалентної схеми СЕ можна подати, як суму постійної складової, що дорівнює корисному струму навантаження й змінної складової, середнє значення якої, розраховане в періоді повторюваності, дорівнює нулю:

$$i_L = I_{usf} + i_{L\sim}(t), \quad (1.149)$$

$$i_{L\sim}(t) = \Delta_I I_{usf} \sin \vartheta, \quad (1.150)$$

де  $0 \leq \Delta_I \leq 1$ .

Переходячи в (1.149), (1.150) до відносних одиниць

$$i_{L*} = 1 + i_{L\sim*}(t) \quad (1.151)$$

і проінтегрувавши криву миттєвого ККД в періоді повторюваності, отримаємо наближене співвідношення для розрахування максимально можливого і реального ККД аналогічне (1.50).

У таблиці 1.4 подано теоретичні максимальні й реальні значення ККД трифазної симетричної СЕ при  $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = 0$ , розраховані за співвідношенням (1.50). Із таблиці зрозуміло, що зниження (втрата) ККД обумовлено пульсацією струму в еквівалентній схемі і, відповідно, пульсацією миттєвої активної потужності.

Реактивний струм еквівалентної схеми (див. рис. 1.24) в розглядуваному режимі дорівнює нулю.

У трифазній симетричній СЕ з синусоїдальними напругами при  $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c \neq 0$  ККД розраховуються так.

За відомим максимально можливим ККД (табл. 1.4) при заданому значенні  $k_{SC}$  або  $K_I$ , якщо  $\varphi = 0$  і  $\Delta_I = 0$ , зі співвідношення

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + A_a(K_I, \varphi, \Delta_I)} \quad (1.152)$$

визначимо

$$A_a(K_I, \varphi, \Delta_I) = \frac{1}{\eta_{\max}} - 1. \quad (1.153)$$

Припустивши, що втрати енергії, обумовлені активним і реактивним струмами, взаємно незалежні, запишемо співвідношення:

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + A_a + A_p}, \quad (1.154)$$

де

$$A_p = \frac{A_a}{\cos^2 \varphi} \sin^2 \varphi = A_a \operatorname{tg}^2 \varphi. \quad (1.155)$$

З (1.153) – (1.155) отримаємо розрахункову формулу

$$\eta_{AVreal} = \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{\eta_{\max}} - 1 \right) (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}. \quad (1.156)$$

За формулою (1.156), використавши дані таблиці (1.4), розрахуємо реальні значення ККД (результати подано в таблиці 1.10).

Таблиця 1.10 – Теоретичні реальні значення ККД трифазної СЕ симетричних синусоїдальних напруг при  $\Delta_I = 0$

$k_{SC}$	6	10	12	14	15	16	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$\varphi K_I$	0,211	0,113	0,092	0,077	0,072	0,067	0,059	0,052	0,042	0,034	0,026	0,020	0,017	0,014	0,010
$\eta_{\max}^0$	0,789	0,887	0,908	0,923	0,928	0,933	0,941	0,947	0,958	0,965	0,974	0,98	0,983	0,986	0,99
$\eta_{AVreal}^{\pi/12}$	0,747	0,861	0,887	0,904	0,91	0,917	0,926	0,934	0,947	0,956	0,967	0,975	0,979	0,982	0,987
$\eta_{AVreal}^{\pi/6}$	0,704	0,833	0,863	0,884	0,891	0,898	0,91	0,919	0,935	0,946	0,96	0,969	0,973	0,978	0,984
$\eta_{AVreal}^{\pi/4}$	0,652	0,797	0,833	0,857	0,866	0,874	0,889	0,899	0,919	0,932	0,949	0,961	0,967	0,972	0,98
$\eta_{AVreal}^{\pi/3}$	0,578	0,742	0,785	0,814	0,825	0,836	0,854	0,867	0,893	0,91	0,932	0,947	0,955	0,963	0,973
$\eta_{AVreal}^{5\pi/12}$	0,442	0,625	0,679	0,717	0,731	0,746	0,771	0,791	0,828	0,853	0,888	0,912	0,924	0,937	0,954

Як впливає з аналізу таблиць 1.4 і 1.10, при  $8 \leq k_{SC} \leq 30$  збільшення кута зсуву струму відносно напруги від 0 до  $\pi/6$  призводить до зменшення ККД на 6,7 %–2 % відповідно. У таблиці 1.11 наведено значення втрати ККД для всього обраного діапазону змінювання параметрів СЕ.

#### 1.4.3 Трифазна СЕ з асиметричним навантаженням

Пофазною асиметрією навантажень характеризуються комунальні споживачі: житлові будинки, офісні й торгівельні центри, театри й інші об'єкти. Комунальні СЕ виконуються трифазними чотирипровідними. Потужність втрат електроенергії в чотирипровідній СЕ визначається відповідно до еквівалентної схеми, як зображено на рисунку 1.1.

Таблиця 1.11 – Втрати ККД в трифазній симетричній СЕ синусоїдальних напруг і струмів  $\Delta\eta = \eta_{\max} - \eta_{AVreal}$  за  $\Delta_I = 0$

$k_{SC}$	6	10	12	14	15	16	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$\varphi \backslash K_I$	0,211	0,113	0,092	0,077	0,072	0,067	0,059	0,052	0,042	0,034	0,026	0,020	0,017	0,014	0,010
0 $\eta_{\max}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\pi/12$ $\eta_{AVreal}$	0,042	0,026	0,021	0,019	0,018	0,016	0,015	0,013	0,011	0,009	0,007	0,005	0,004	0,004	0,003
$\pi/6$ $\eta_{AVreal}$	0,085	0,054	0,045	0,039	0,037	0,035	0,031	0,028	0,023	0,019	0,014	0,011	0,01	0,008	0,006
$\pi/4$ $\eta_{AVreal}$	0,137	0,09	0,075	0,066	0,062	0,059	0,052	0,048	0,039	0,033	0,025	0,02	0,016	0,014	0,01
$\pi/3$ $\eta_{AVreal}$	0,211	0,145	0,123	0,109	0,103	0,097	0,087	0,08	0,065	0,055	0,042	0,033	0,028	0,023	0,017
$5\pi/12$ $\eta_{AVreal}$	0,347	0,262	0,229	0,206	0,197	0,187	0,17	0,156	0,13	0,112	0,086	0,068	0,059	0,049	0,036

Напруга джерела еквівалентної схеми дорівнює модулю просторового вектора напруги, який під час аналізу вважаємо постійним у часі відповідно до співвідношення (1.59). Три струми еквівалентної схеми – це проекції просторового вектора струму на осі системи координат  $p$ ,  $q$ ,  $r$  відповідно, вісь  $p$  якої співпадає за напрямом із результуючим вектором напруги [38]. Модулі проекції вектора струму на осі  $p$ ,  $q$ ,  $r$  визначаються за відомими значеннями фазних струмів із співвідношень (1.1) – (1.5). Опори  $R_S$  еквівалентної схеми (див. рис. 1.1) дорівнюють омичному опору фази лінії СЕ, а опір  $R_n$  дорівнює омичному опору нульового проводу. Із рисунка 1.1 і співвідношень (1.1) – (1.5) впливає, що передача енергії в СЕ визначається активною складовою просторового

вектора струму, що за напрямом співпадає з віссю  $p$  системи координат  $pqr$  і, отже, з просторовим вектором напруги, модуль якого  $U_S = \text{const}$ .

Реактивні складові просторового вектора струму визначають втрати енергії в опорах  $R_S$  і  $R_n$ .

У струмі нульового проводу можна виокремити дві базові складові: складову, що змінюється з частотою мережі (50 Гц), обумовлену пофазною асиметрією навантаження, й складову з потрійною частотою мережі (150 Гц), обумовлену нелінійністю навантаження. Відносні значення цих складових:

$$\Delta_{50} = \frac{I_{N50}}{I_{usf}}, \quad (1.157)$$

$$\Delta_{150} = \frac{I_{N150}}{I_{usf}}. \quad (1.158)$$

Відносний сумарний діючий струм нульового проводу  $\Delta_n$  визначається за співвідношенням (1.9).

Якщо припустити, що втрати від усіх складових просторового вектора струму взаємно незалежні, то втрати в нульовому проводі

$$\Delta P_n = R_n \Delta_n^2 I_{usf}^2, \quad (1.159)$$

або

$$\Delta P_n = k_n R_S \Delta_n^2 I_{usf}^2, \quad (1.160)$$

де  $k_n$  визначається за (1.8).

У таблиці 1.12 наведено значення ККД із урахуванням втрат у нульовому проводі, розрахованих за співвідношенням

$$\eta_n \cong \frac{1}{1/\eta_{AVreal} + k_n K_I \Delta_n^2}, \quad (1.161)$$

де  $\eta_{AVreal}$  – відповідні значення ККД (табл. 1.10).

Співвідношення (1.161) отримано за умови, що  $P_{usf} \cong U_S I_{usf}$ .

Таблиця 1.12 – Теоретичні й експериментальні залежності, що ілюструють змінювання ККД залежно від параметрів трифазної чотирипровідної СЕ

$k_{sc} = 6, K_I = 0,211, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,789$							$k_{sc} = 8, K_I = 0,146, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,854$						
$\varphi$	$\Delta_n$												
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	
0	0,789	0,788	0,781	0,757	0,721	0,676	0,854	0,853	0,847	0,828	0,798	0,759	
$\pi/12$	0,747	0,746	0,74	0,719	0,686	0,645	0,822	0,821	0,816	0,798	0,77	0,734	
$\pi/6$	0,704	0,704	0,698	0,679	0,65	0,613	0,788	0,787	0,782	0,766	0,740	0,707	
$\pi/4$	0,652	0,651	0,646	0,63	0,605	0,573	0,745	0,744	0,740	0,725	0,702	0,672	
$\pi/3$	0,578	0,577	0,574	0,561	0,541	0,515	0,682	0,681	0,678	0,665	0,646	0,620	
$k_{sc} = 10, K_I = 0,113, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,887$							$k_{sc} = 12, K_I = 0,092, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,908$						
$\varphi$	$\Delta_n$												
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	
0	0,887	0,886	0,881	0,865	0,840	0,806	0,908	0,907	0,903	0,889	0,867	0,838	
$\pi/12$	0,861	0,860	0,856	0,841	0,816	0,758	0,887	0,886	0,882	0,869	0,848	0,820	
$\pi/6$	0,833	0,832	0,828	0,814	0,791	0,761	0,863	0,962	0,859	0,846	0,826	0,800	
$\pi/4$	0,797	0,796	0,793	0,779	0,759	0,731	0,833	0,832	0,829	0,817	0,799	0,774	
$\pi/3$	0,742	0,741	0,738	0,727	0,709	0,685	0,758	0,784	0,781	0,771	0,754	0,732	
$k_{sc} = 14, K_I = 0,077, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,923$							$k_{sc} = 15, K_I = 0,072, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,928$						
$\varphi$	$\Delta_n$												
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	
0	0,923	0,922	0,919	0,907	0,888	0,862	0,928	0,927	0,924	0,913	0,894	0,870	
$\varphi$	$\Delta_n$												
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	
$\pi/12$	0,904	0,903	0,900	0,889	0,870	0,845	0,910	0,909	0,906	0,895	0,878	0,854	
$\pi/6$	0,884	0,883	0,880	0,869	0,851	0,828	0,891	0,890	0,887	0,877	0,860	0,837	
$\pi/4$	0,857	0,856	0,853	0,843	0,826	0,804	0,866	0,865	0,863	0,853	0,837	0,815	
$\pi/3$	0,814	0,813	0,811	0,801	0,786	0,766	0,825	0,825	0,822	0,813	0,798	0,779	
$k_{sc} = 16, K_I = 0,067, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,933$							$k_{sc} = 18, K_I = 0,059, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,941$						
$\varphi$	$\Delta_n$												
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	
0	0,933	0,932	0,929	0,919	0,901	0,878	0,941	0,940	0,938	0,928	0,913	0,892	
$\pi/12$	0,917	0,916	0,913	0,903	0,886	0,864	0,926	0,925	0,923	0,914	0,898	0,878	
$\pi/6$	0,898	0,897	0,895	0,885	0,869	0,847	0,910	0,910	0,907	0,898	0,883	0,864	
$\pi/4$	0,874	0,873	0,871	0,861	0,846	0,826	0,889	0,889	0,886	0,877	0,864	0,845	
$\pi/3$	0,836	0,836	0,833	0,824	0,810	0,792	0,854	0,854	0,851	0,843	0,830	0,813	
$k_{sc} = 20, K_I = 0,053, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,947$							$k_{sc} = 25, K_I = 0,042, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,958$						

Продовження таблиці 1.12

$\varphi$	$\Delta_n$											
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1
0	0,947	0,947	0,944	0,935	0,921	0,902	0,958	0,958	0,956	0,948	0,937	0,921
$\pi/12$	0,934	0,934	0,931	0,923	0,909	0,890	0,947	0,947	0,945	0,938	0,926	0,911
$\pi/6$	0,919	0,919	0,916	0,908	0,894	0,876	0,935	0,935	0,933	0,926	0,915	0,900
$\pi/4$	0,899	0,899	0,896	0,888	0,876	0,858	0,919	0,919	0,917	0,910	0,899	0,885
$\pi/3$	0,867	0,867	0,865	0,857	0,845	0,829	0,893	0,893	0,891	0,885	0,875	0,861
$k_{sc}=30, K_I=0,035, k_n=1, \eta_{\max}=0,966$							$k_{sc}=40, K_I=0,026, k_n=1, \eta_{\max}=0,974$					
$\varphi$	$\Delta_n$											
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1
0	0,965	0,965	0,963	0,957	0,947	0,933	0,974	0,974	0,972	0,968	0,960	0,950
$\pi/12$	0,956	0,956	0,954	0,948	0,938	0,925	0,967	0,967	0,965	0,961	0,954	0,943
$\pi/6$	0,946	0,946	0,944	0,938	0,929	0,916	0,960	0,960	0,959	0,954	0,947	0,937
$\pi/4$	0,932	0,932	0,930	0,924	0,915	0,903	0,949	0,949	0,948	0,943	0,936	0,926
$\pi/3$	0,910	0,910	0,908	0,903	0,894	0,882	0,932	0,932	0,931	0,926	0,919	0,910
$k_{sc}=50, K_I=0,02, k_n=1, \eta_{\max}=0,98$							$k_{sc}=60, K_I=0,017, k_n=1, \eta_{\max}=0,983$					
$\varphi$	$\Delta_n$											
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1
0	0,980	0,980	0,979	0,975	0,969	0,961	0,983	0,983	0,982	0,979	0,974	0,967
$\pi/12$	0,975	0,975	0,974	0,970	0,964	0,956	0,979	0,979	0,978	0,975	0,970	0,963
$\pi/6$	0,969	0,969	0,968	0,964	0,959	0,951	0,973	0,973	0,972	0,969	0,964	0,957
$\pi/4$	0,961	0,961	0,960	0,956	0,951	0,943	0,967	0,967	0,966	0,963	0,958	0,951
$\pi/3$	0,947	0,947	0,946	0,943	0,937	0,929	0,955	0,955	0,954	0,951	0,946	0,940
$k_{sc}=75, K_I=0,014, k_n=1, \eta_{\max}=0,986$							$k_{sc}=100, K_I=0,01, k_n=1, \eta_{\max}=0,99$					
$\varphi$	$\Delta_n$											
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1
0	0,986	0,986	0,985	0,983	0,978	0,973	0,990	0,990	0,989	0,988	0,985	0,980
$\pi/12$	0,982	0,982	0,981	0,979	0,974	0,969	0,987	0,987	0,986	0,985	0,982	0,977
$\pi/6$	0,978	0,978	0,977	0,975	0,971	0,965	0,984	0,984	0,983	0,982	0,979	0,974
$\pi/4$	0,972	0,972	0,971	0,969	0,965	0,959	0,980	0,980	0,979	0,978	0,975	0,970
$\pi/3$	0,963	0,963	0,962	0,960	0,956	0,950	0,973	0,973	0,972	0,971	0,968	0,964

#### 1.4.4 Перевірка теоретичних результатів

Схему віртуального експерименту для перевірки теоретичних результатів наведено на рисунку 1.13. Експеримент виконувався за таким алгоритмом:

1. Задаємось значеннями параметрів СЕ:  $U_m = 100$  В,  $I_m = 100$  А, кут  $\varphi$ , коефіцієнти  $k_n$ ,  $K_I$  для кожної комірки таблиці 1.10.



2. За співвідношенням (1.148) розраховуємо для обраного поєднання параметрів значення опору лінії:

$$R_s = \frac{U_m K_I}{I_m \cos \varphi}. \quad (1.162)$$

3. Запускаємо Matlab-модель на час, що дорівнює періоду повторюваності і зчитуємо значення ККД.

4. Складаємо таблицю ККД аналогічну до таблиці 1.10.

Matlab-модель схеми віртуального експерименту наведено на рисунку 1.14.

Результати віртуального експерименту зведено в таблицю 1.13.

Таблиця 1.13 – Результати експерименту в трифазній симетричній СЕ з активно-індуктивним навантаженням

$k_{SC}$	6	10	12	14	15	16	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$\varphi/K_I$	0,211	0,113	0,092	0,077	0,072	0,067	0,059	0,052	0,042	0,034	0,026	0,020	0,017	0,014	0,010
$\eta_{\max}$	0,789	0,887	0,908	0,923	0,928	0,933	0,941	0,947	0,958	0,965	0,974	0,98	0,983	0,986	0,99
$\pi/12$	0,744	0,879	0,902	0,917	0,922	0,929	0,937	0,943	0,955	0,963	0,972	0,978	0,981	0,985	0,99
$\eta_{AVreal}$															
$\pi/6$	0,718	0,849	0,878	0,897	0,904	0,911	0,922	0,93	0,943	0,954	0,965	0,973	0,977	0,982	0,986
$\eta_{AVreal}$															
$\pi/4$	0,579	0,774	0,816	0,846	0,856	0,866	0,883	0,894	0,917	0,929	0,948	0,96	0,966	0,972	0,98
$\eta_{AVreal}$															
$\pi/3$	0,156	0,548	0,632	0,692	0,712	0,732	0,764	0,788	0,832	0,86	0,896	0,92	0,932	0,944	0,96
$\eta_{AVreal}$															

Порівнявши результати таблиць 1.13 і 1.10, робимо висновок про те, що прийняті припущення щодо незалежності напруги на навантаженні від реактивної складової струму справедливі, якщо кут зсуву між напругою і струмом не перевищує  $\pi/4$ .

Схема СЕ з синусоїдальними симетричними напругами джерела й асиметричними нелінійними навантаженнями та її Matlab-модель співпадають зі схемою, наведеною на рисунку 1.13, і її моделлю на рисунку 1.14. Напругу джерела визначають за (1.74). Фазні струми в асиметричній схемі з нелінійними навантаженнями

$$\begin{aligned} i_{La} &= I_{ma} \sin(\vartheta - \varphi) - K_{3a} I_{ma} \sin 3(\vartheta - \varphi), \\ i_{Lb} &= I_{mb} \sin\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) - K_{3b} I_{mb} \sin 3(\vartheta - \varphi), \\ i_{Lc} &= I_{mc} \sin\left(\vartheta - \frac{4\pi}{3} - \varphi\right) - K_{3c} I_{mc} \sin 3(\vartheta - \varphi), \end{aligned} \quad (1.163)$$

де  $K_{3a}$ ,  $K_{3b}$ ,  $K_{3c}$  – коефіцієнти, що враховують відносні амплітуди третіх гармонік.

Співвідношення (1.163) описує трифазну СЕ тільки на підставі основних і третій гармонік струму. Можна змодельовати струми мережі будь-якої форми. Спрощення моделі ґрунтується на тому факті, що в промислових системах основна й третя гармоніки зазвичай за значеннями значно перевищують інші гармоніки струму.

У загальному випадку  $I_{ma} \neq I_{mb} \neq I_{mc}$ ,  $K_{3a} \neq K_{3b} \neq K_{3c}$ .  
Прийmemo  $0 \leq K_3 \leq 1$ .

Розглянемо алгоритм віртуального експерименту, використавши Matlab-модель, наведену на рисунку 1.14.

1. Задаємося значенням  $K_I$  або  $k_{SC}$  відповідно до таблиці 1.12, а також значенням  $k_n$ , наприклад  $k_n = 1$ .

2. У співвідношеннях (1.37), (1.163) задаємося значеннями  $U_m = 100$  В,  $f_s = 50$  Гц,  $I_{ma} = 120$  А,  $I_{mb} = 100$  А,  $I_{mc} = 70$  А,  $K_{3a} = K_{3b} = K_{3c} = 0,5$ .

3. За співвідношенням (1.162) розраховуємо  $R_S$ , беручи до уваги, що

$$I_m = \sqrt{\frac{I_{ma}^2 + I_{mb}^2 + I_{mc}^2}{3}}. \quad (1.164)$$

4. Запускаємо комп'ютерну симуляцію на час, кратний періоду повторюваності  $T$ , наприклад 1 с.

5. У процесі роботи моделі розраховуємо миттєве значення модуля вектора корисного активного струму:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix}, \quad (1.165)$$

$$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} I_m(t) = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2}; \quad (1.166)$$

діюче значення корисного струму навантаження (1.145) і діюче значення струму в нульовому проводі:

$$I_{RMSn} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_n^2 dt}. \quad (1.167)$$

6. За (1.145), (1.167) розраховуємо експериментальне значення відносного сумарного діючого струму нульового проводу:

$$\Delta_{n \text{ експ}} = \frac{I_{RMSn}}{I_{usf}}. \quad (1.168)$$

7. Зчитуємо середнє експериментальне значення ККД за період повторюваності.

8. Порівнюємо розраховані за таблицею 1.12 і експериментальні значення ККД.

Визначено експериментальні значення ККД для всіх 400 варіантів поєднання параметрів, наведених в таблиці 1.12. Частину експериментальних результатів наведено в таблиці 1.14.

Порівнявши теоретичні наближені значення ККД таблиці 1.12 з точними значеннями таблиці 1.14, робимо висновок про те, що ці значення близькі, якщо кут  $\varphi$  змінюється в діапазоні від 0 до  $\pi/4$ . При  $\varphi > \pi/4$  в кривих миттєвої активної потужності з'являються інтервали з від'ємними значеннями, що призводить до виникнення похибки. В інтервалах часу, за умови, що  $p_s > 0$ ,  $p_L < 0$ , джерело й навантаження одночасно віддають енергію в резистор  $R_s$ . ККД у цих інтервалах дорівнює нулю. Такий режим при прийнятих припущеннях не розглядається. Таким чином, дані таблиці 1.12 можна використовувати під час оцінювання ККД СЕ за умови, що  $\varphi \leq \pi/4$ . Отримані розрахункові формули й дані таблиці 1.12 дають змогу визначити енергетичну ефективність застосування САФ, що підмикається паралельно до навантаження. Для цього мають бути відомі параметри еквівалентної схеми електропостачання: потужність її резистивного короткого замикання, відносне значення корисної активної потужності або активного струму навантаження й форма графіка активної потужності. Крім того, варто врахувати втрати енергії в САФ.

Таблиця 1.14 – Теоретичні та експериментальні залежності, що ілюструють змінювання ККД залежно від параметрів трифазної чотиріпровідної СЕ

$k_{sc} = 15, K_I = 0,072, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,928$							$k_{sc} = 20, K_I = 0,053, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,947$					
$\varphi$	$\Delta_n$											
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1
0	0,923	0,922	0,918	0,905	0,883	0,852	0,943	0,943	0,94	0,93	0,914	0,891
$\pi/12$	0,917	0,916	0,912	0,898	0,874	0,841	0,939	0,938	0,935	0,925	0,908	0,883
$\pi/6$	0,897	0,896	0,891	0,874	0,844	0,803	0,924	0,924	0,92	0,907	0,886	0,855
$\pi/4$	0,945	0,843	0,836	0,81	0,766	0,704	0,886	0,885	0,879	0,86	0,828	0,782
$\pi/3$	0,69	0,687	0,673	0,62	0,532	0,409	0,772	0,77	0,759	0,72	0,655	0,565
$k_{sc} = 30, K_I = 0,035, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,966$							$k_{sc} = 50, K_I = 0,02, k_n = 1, \eta_{\max} = 0,98$					
$\varphi$	$\Delta_n$											
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1
0	0,962	0,962	0,96	0,954	0,943	0,928	0,979	0,978	0,977	0,974	0,968	0,959
$\pi/12$	0,96	0,96	0,958	0,951	0,939	0,924	0,977	0,976	0,975	0,971	0,965	0,955
$\pi/6$	0,95	0,95	0,948	0,939	0,925	0,905	0,971	0,971	0,97	0,965	0,957	0,946
$\pi/4$	0,924	0,923	0,92	0,907	0,885	0,855	0,957	0,957	0,955	0,948	0,936	0,919
$\pi/3$	0,849	0,848	0,841	0,815	0,772	0,713	0,914	0,913	0,909	0,894	0,87	0,836

Для прикладу розглянемо СЕ, параметри якої співвідносяться з п'ятим рядком ( $\varphi = \pi/4$ ) і шостим стовбцем ( $\Delta_n = 0,75$ ) при  $k_{SC} = 20$  (табл. 1.12). При  $K_I = 0,053$ ,  $k_n = 1$ ,  $\varphi = \pi/4$  реальний теоретичний ККД дорівнює  $\eta_{AVreal} = 0,845$ . Якщо паралельно до навантаження підімкнути САФ, що компенсує струм в нульовому проводі й забезпечує синусоїдальність і симетрію струмів джерела при підтриманні кута  $\varphi = 0$ , то ККД СЕ, що розглядається, буде дорівнювати  $\eta_{max} = 0,958$  (див. комірку, що відповідає другому рядку й другому стовбцю таблиці). Власний ККД САФ становить 97 %. З урахуванням цього приріст ККД внаслідок використання САФ буде становити  $\Delta\eta = 0,958 - 0,845 - 0,02 = 0,093$ .

## Висновки за розділом 1

1. Сучасний рівень розвитку силових електроніки забезпечує підвищення ККД систем електропостачання за умови використання таких можливостей: застосування силових активних фільтрів і активних випрямлячів і, на їхній базі, компенсаторів реактивної й миттєвої активних потужностей; широке використання енергоємних накопичувачів енергії для компенсації пульсацій миттєвої активної потужності в перетворювальних системах електропостачання з динамічними навантаженнями; перехід в комунальних мережах електропостачання від однофазних систем до трифазних, що уможливить зменшення втрат енергії і витрат провідникових матеріалів у кабелях.

2. Максимально можливий й реальний ККД двох систем електропостачання – постійної напруги та трифазної симетричної синусоїдальної напруги мають однаковий середній за період повторюваності ККД за однакових значень відношення потужності резистивного короткого замикання до корисної потужності навантаження або однакових значень відношення корисного струму навантаження до струму резистивного короткого замикання.

3. Коефіцієнти корисної дії СЕ однофазної змінної напруги залежать від форми струму навантаження. У разі, якщо навантаження чисто резистивне й струм навантаження має прямокутну форму, СЕ однофазної змінної напруги прямокутної форми еквівалентна СЕ постійної напруги й для неї справедливі співвідношення, отримані для СЕ постійної напруги.

4. В розділі отримано розрахункові формули й таблиці, що дають змогу приблизно оцінити максимальний і реальний ККД систем електропостачання за їхніми відомими параметрами й графіком струму навантаження.

5. Розрахункові формули, що дають змогу приблизно оцінити максимальний і реальний ККД СЕ зі змінною напругою прямокутної форми при синусоїдальному й відстаючому за фазою від напруги джерела струмі навантаження, є справедливими для СЕ змінної синусоїдальної напруги джерела в разі прямокутної форми струму навантаження.

6. При однакових активних потужностях і однакових діючих значеннях фазних напруг однофазна СЕ характеризується в два рази більшими втратами електроенергії в провідниках і в два рази більшими витратами міді, ніж трифазна СЕ.

7. Розроблено метод розрахування максимально можливого й реального ККД трифазної СЕ з несиметричним нелінійним навантаженням, зокрема в разі підімкнення паралельно до навантаження силового активного фільтра, за відомими для СЕ потужністю резистивного КЗ, відносною корисною середньою активною потужністю і формою графіка миттєвої активної потужності.

8. Синтезовано Matlab-модель СЕ, що дає змогу точно розрахувати ККД за відомими параметрами й графіками миттєвої активної потужності.

9. Шляхом порівняння теоретичних (що базуються на прийнятих припущеннях) значень ККД і значень, отриманих унаслідок чотирьохсот віртуальних експериментів, було доведено тотожність результатів за умови, що значення кута зсуву струму відносно напруги відбувається в діапазоні  $0 \leq \varphi \leq \pi/4$ .

10. Подальше спрямування досліджень щодо підвищення енергоефективності трифазних СЕ шляхом використання енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів і накопичувачів електроенергії пов'язане з розвитком тверджень сучасної теорії миттєвих активної і реактивної потужностей для переходу від реактивної потужності, а також пульсацій миттєвої активної потужності до потужності втрат.

## **РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ЕФЕКТУ В ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Втрати електроенергії в системі електропостачання обумовлені багатьма причинами, пов'язаними, насамперед, з характеристиками й режимами роботи генераторів, навантаження, а також параметрами з'єднувальних кабелів. Багато взаємопов'язаних чинників, що обумовлюють виникнення втрат електричної енергії в системі електропостачання, ускладнюють їхнє розрахування, особливо при стахостичності змінювання параметрів навантаження [34].

Традиційні методи розрахування потужності втрат зазвичай оперують із наслідками і не вказують на причину їх виникнення [18–20; 67]. Окремо визначають втрати в елементах системи електропостачання: обмотках генераторів, трансформаторах, з'єднувальних кабелях, захисних і комутаційних апаратах, перетворювачах, фільтрокомпенсуючих пристроях тощо. У разі використання терміна «мінімізація втрат» встановити межі мінімізації зазвичай складно. Визначення потужності втрат у системах електропостачання, що функціонують за принципами Smart Grid, ускладнюється наявністю двобічного енергетичного потоку. Ці та інші аспекти унеможливають виконання аналізу енергетичної ефективності при підімкненні до СЕ САФ і обґрунтування доцільності його використання.

У цьому розділі систематизовано взаємні перетворення просторових координатних систем, визначено умови, за яких трифазна СЕ працює з мінімально можливими втратами енергії; сформульовано теорему, що обумовлює мінімум потужності втрат, визначено кількість можливих режимів роботи трифазної СЕ з двоспрямованим енергетичним потоком, у яких виникають додаткові втрати; запропоновано розрахункові методи оцінювання енергетичної ефективності від компенсації реактивної потужності і пульсацій миттєвої активної потужності внаслідок використання в СЕ САФ з енергоємним накопичувачем енергії в ланці постійного струму; сформульовано умови, за яких зазначені заходи економічно обґрунтовані.

## 2.1 Перетворення систем координат у силовій електроніці й електроприводі

У теорії миттєвих активної і реактивної потужностей для описання електромагнітних процесів і синтезу систем керування силовим активним фільтром й активним випрямлячем використовуються перетворення координат просторових векторів напруг і струмів. Якщо в теорії електричних машин змінного струму зазвичай розглядаються симетричні трифазні трипровідні СЕ, для аналізу яких достатньо переходу від нерухомої плоскої трифазної системи координат АВС до обертової плоскої системи координат  $dq$ , то в теорії потужності, що оперує асиметричними трифазними трипровідними й чотирипровідними СЕ, необхідно розглядати узагальнені вектори в просторових системах координат  $abc$ ,  $\alpha\beta 0$ ,  $dq0$  або  $pqr$  [4; 6; 16; 32; 38; 51; 55; 58; 59; 92; 94; 110; 112; 120; 121; 122; 123; 127], а також  $pgw$ ,  $\gamma\delta 0$  [70].

У синтезі систем управління САФ найефективнішим є перехід від просторової нерухомої декартової системи координат  $abc$  до обертової просторової декартової системи координат  $pqr$ , у якій вісь  $p$  спрямована за просторовим вектором напруги [110]. Така орієнтація осі  $p$  уможливорює створення двох незалежних контурів регулювання реактивної потужності за ортогональними осями  $q$  і  $r$ .

Взаємні перетворення координатних систем детально вивчалися у роботах [4; 9; 16; 32; 38; 55; 58; 59; 70; 92; 94; 110; 112; 120; 121; 122; 123; 127], що уможливорює їхню систематизацію. У довідковому посібнику [38] наведено однотипні за формою записи формули для 26 перетворень у трьох плоских і в п'яти просторових системах координат. Запропоновано також модернізоване перетворення Park [32], яке замінило перетворення Park у відомому вигляді [6; 55; 58], коректному для трифазних симетричних СЕ без нульового проводу, а отже, для аналізу перехідних процесів у машинах змінного струму, що, однак, різниться неточністю під час аналізу трифазних чотирипровідних СЕ з асиметричним навантаженням [32].

У таблиці 2.1 наведено можливі перетворення координат для трьох плоских (АВС,  $\alpha\beta$ ,  $dq$ ) та семи просторових ( $abc$ ,  $\alpha\beta 0$ ,  $dq0$ ,  $pqr$ ,  $a'b'c'$ ,  $pgw$ ,  $\gamma\delta 0$ ) систем координат, що починаються в одній точці. Системи координат АВС,  $\alpha\beta$ ,  $abc$ ,  $\alpha\beta 0$  – нерухомі, а системи координат  $dq$   $dq0$ ,  $pqr$ ,  $pgw$ ,  $\gamma\delta 0$ ,  $a'b'c'$  – обертові. Пояснювальну схему взаємного розташування просторових координатних систем наведено на рисунках 2.1–2.3.

Як опорну координатну систему на рисунках 2.2 і 2.3 обрано систему координат  $\alpha\beta 0$  (рис. 2.1), відносно якої побудовані всі інші системи (рис. 2.2, 2.3).

Таблиця 2.1 – Можливі перетворення координат

	Плоскі			Просторові						
	ABC	$\alpha\beta$	dq	abc	$\alpha\beta 0$	dq0	pqr	a'b'c'	pgw	$\gamma\delta 0$
ABC		+	+	+						
$\alpha\beta$	+		+	+						
dq	+	+		+						
abc	+	+	+		+	+	+	+		+
$\alpha\beta 0$				+		+	+		+	+
dq0				+	+		+		+	+
pqr				+	+	+		+	+	+
a'b'c'				+			+		+	+
pgw					+	+	+	+		+
$\gamma\delta 0$				+	+	+	+	+	+	

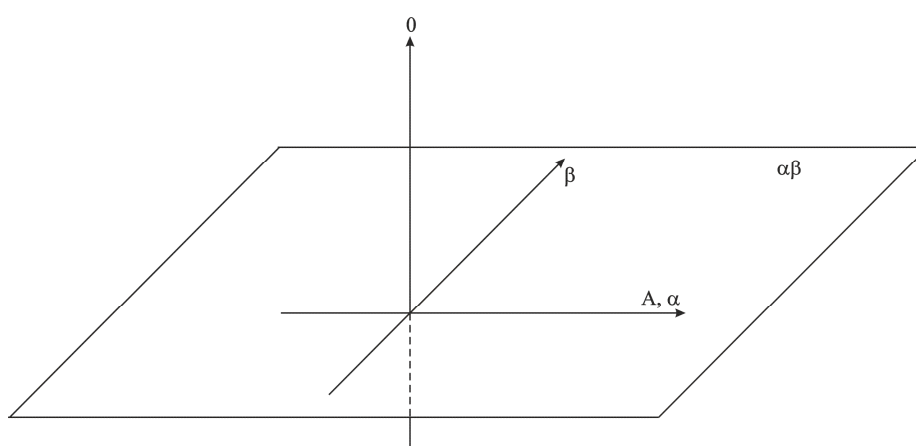


Рисунок 2.1 – Просторова координатна система  $\alpha\beta 0$

Варто зазначити, що з п'яти рухомих просторових систем координат осі  $a'$  і  $d$  систем  $a'b'c'$  і  $dq0$  співпадають за напрямом із проекцією узагальненого вектора напруги на площину  $\alpha\beta$  ( $u_{\alpha\beta}$ ); вісь  $p$  систем  $pqr$  і  $pgw$  співпадає за напрямом із просторовим вектором напруги, вісь  $w$  системи  $pgw$  – із просторовим вектором реактивної потужності. Вісь  $\gamma$  координатної системи  $\gamma\delta 0$  за напрямом співпадає зі складовою вектора реактивної потужності  $\vec{q}_{\alpha\beta}$ , локалізованою у площині  $\alpha\beta$  і набуває ненульове значення лише за наявності нульової складової в будь-якому з векторів  $\vec{u}$  чи  $\vec{i}$  [70].



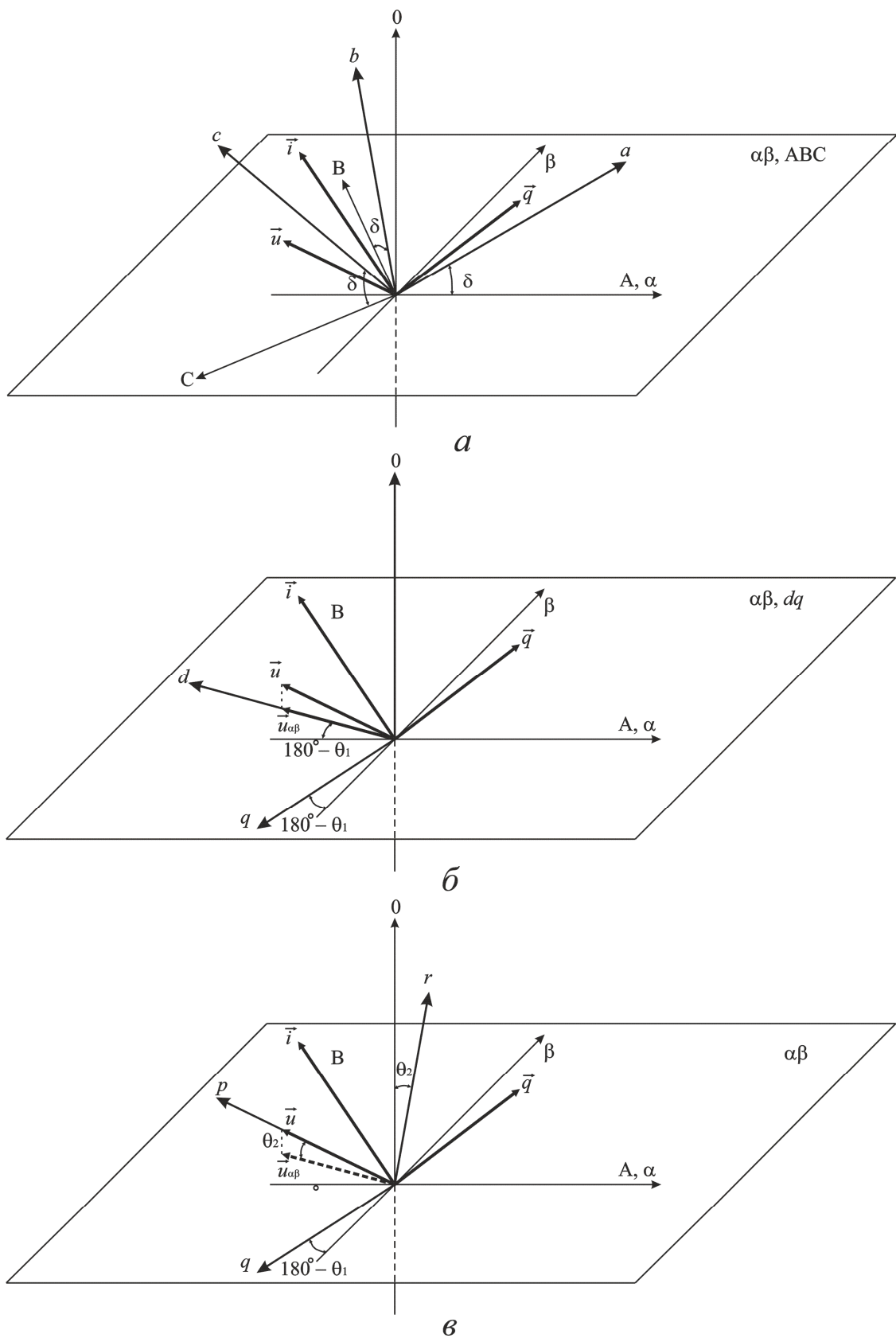


Рисунок 2.2 – Узагальнені вектори напруги, струму й реактивної потужності в просторових системах координат: *a* – abc, *б* – dq0, *в* – pqr

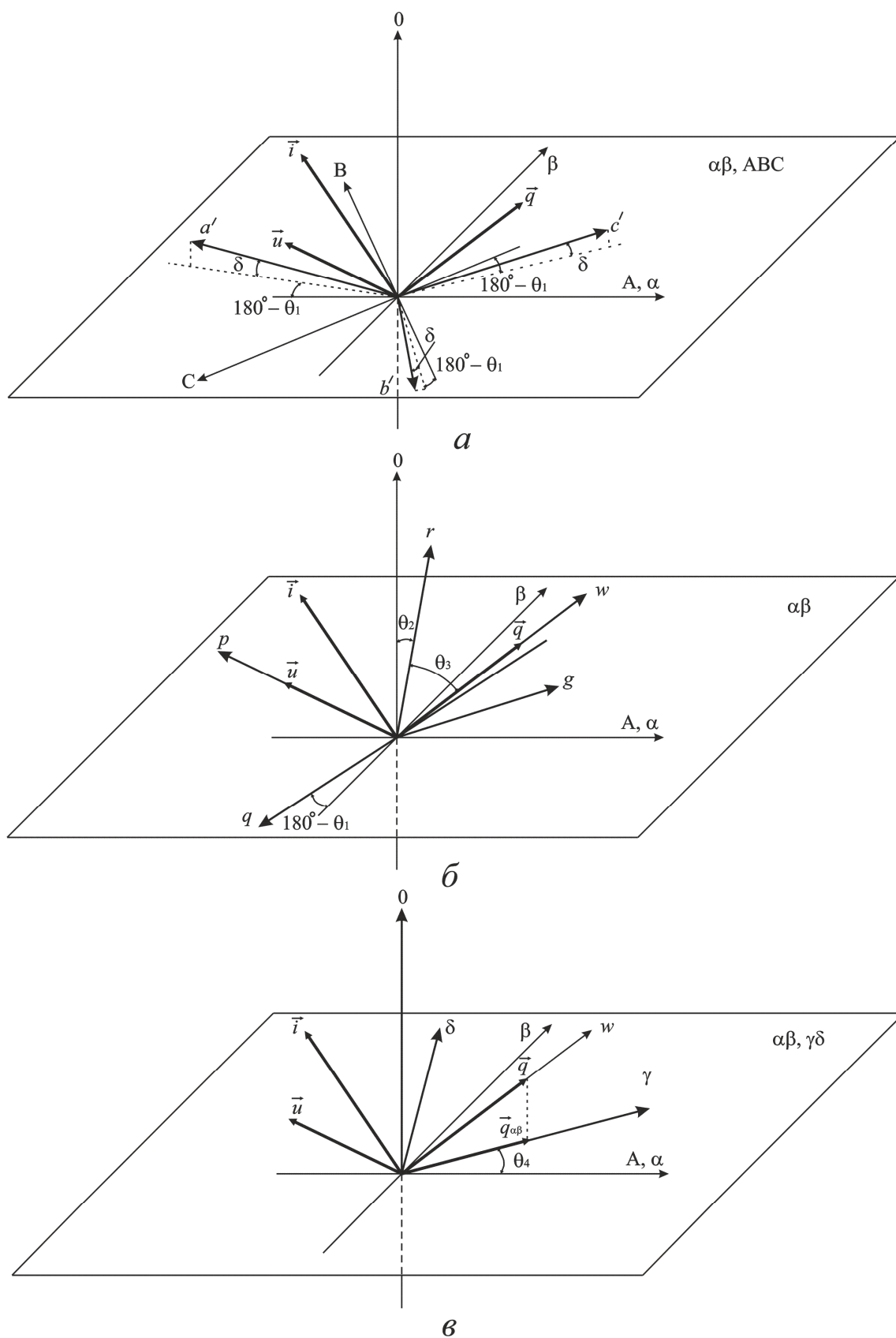


Рисунок 2.3 – Узагальнені вектори напруги, струму й реактивної потужності в просторових системах координат:  $a - a'b'c'$ ,  $б - pgw$ ,  $в - \gamma\delta\theta$

У додатку А наведено таблицю з матричними співвідношеннями, що визначають можливі перетворення координат для семи просторових систем. Співвідношення для перетворення координатних систем  $abc$ ,  $\alpha\beta 0$ ,  $dq0$ ,  $pqr$ ,  $a'b'c'$  наведено у [38]. У роботі [70] отримано векторні співвідношення для описання двох нових систем координат  $pgw$  і  $\gamma\delta 0$ , але співвідношень для переходу в інші координатні системи не запропоновано. У додатку А наведено 18 нових перетворень координат, що відповідають двом новим просторовим декартовим координатним системам:  $abc \rightarrow \gamma\delta 0$ ,  $abc \leftarrow \gamma\delta 0$ ,  $\alpha\beta 0 \rightarrow pgw$ ,  $\alpha\beta 0 \leftarrow pgw$ ,  $\alpha\beta 0 \rightarrow \gamma\delta 0$ ,  $\alpha\beta 0 \leftarrow \gamma\delta 0$ ,  $dq0 \rightarrow pgw$ ,  $dq0 \leftarrow pgw$ ,  $dq0 \rightarrow \gamma\delta 0$ ,  $dq0 \leftarrow \gamma\delta 0$ ,  $pqr \rightarrow pgw$ ,  $pqr \leftarrow pgw$ ,  $pqr \rightarrow \gamma\delta 0$ ,  $pqr \leftarrow \gamma\delta 0$ ,  $a'b'c' \rightarrow pgw$ ,  $a'b'c' \leftarrow pgw$ ,  $pgw \rightarrow \gamma\delta 0$ ,  $pgw \leftarrow \gamma\delta 0$ . Два прямих перетворення  $abc \rightarrow pgw$ ,  $abc \leftarrow pgw$  є досить громіздкими, тому інтересу для практичного використання не становлять.

Координатні перетворення обертових систем здійснюються шляхом розрахування кута повороту, що визначається миттєвими значеннями вимірюваних фазних напруг та струмів. Для координатних систем  $dq0$  та  $pqr$  (рис. 2.2 б, в), прив'язаних до просторового вектора напруги, значення кутів повороту  $\theta_1$  і  $\theta_2$  визначаються миттєвими значеннями фазних напруг:

$$\theta_1 = \arctg\left(\frac{u_\beta}{u_\alpha}\right), \quad (2.1)$$

$$\theta_2 = \arctg\left(\frac{u_0}{u_{\alpha\beta}}\right), \quad (2.2)$$

де

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \quad (2.3)$$

проекції узагальненого просторового вектора напруги на осі координатної системи  $\alpha\beta 0$ ;  $u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}$  – проекція узагальненого просторового вектора напруги на площину  $\alpha\beta$ ;  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  – миттєві значення фазних напруг.

Для координатних систем  $rgw$ ,  $\gamma\delta 0$  (див. рис. 2.3 б, в), прив'язаних до просторового вектора реактивної потужності, значення кутів повороту  $\theta_3$  і  $\theta_4$  визначаються миттєвими значеннями фазних напруг і струмів:

$$\theta_3 = \arctg\left(\frac{i_r}{i_q}\right), \quad (2.4)$$

$$\theta_4 = \arctg\left(\frac{i_{g\beta}}{i_{g\alpha}}\right), \quad (2.5)$$

де

$$i_r = -\frac{u_0 u_\alpha}{u_{\alpha\beta} u_{\alpha\beta 0}} i_\alpha - \frac{u_0 u_\beta}{u_{\alpha\beta} u_{\alpha\beta 0}} i_\beta + \frac{u_{\alpha\beta}}{u_{\alpha\beta 0}} i_0, \quad (2.6)$$

$$i_q = -\frac{u_\beta}{u_{\alpha\beta 0}} i_\alpha + \frac{u_\alpha}{u_{\alpha\beta 0}} i_\beta - \quad (2.7)$$

проекції просторового узагальненого вектора струму на осі  $r, q$  системи координат  $rgw$ ;

$$i_{g\alpha} = (-\sin \theta_1 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3) i_\alpha, \quad (2.8)$$

$$i_{g\beta} = (\cos \theta_1 \cos \theta_3 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3) i_\beta - \quad (2.9)$$

складові проекції узагальненого просторового вектора струму на вісь  $g$  системи координат  $rgw$ ;

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{2}} & -\frac{2}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \quad (2.10)$$

проекції узагальненого просторового вектору струму на осі координатної системи  $\alpha\beta 0$ ;  $u_{\alpha\beta 0} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2}$  – модуль узагальненого просторового вектора напруги;  $i_a, i_b, i_c$  – миттєві значення фазних струмів.

Осі просторових координатних систем  $abc$  та  $a'b'c$  утворюють зі своїми проекціями на площину  $\alpha\beta$  незмінний кут

$$\delta = \arctg\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right). \quad (2.11)$$

## **2.2 Теорема про мінімум втрат енергії в трифазних системах електропостачання**

Сучасні теорії миттєвих активних і реактивних потужностей, поява яких пов'язана з роботами Н. Akagi, Y. Kanazava, A. Nubae 1983–1984 років [92; 94], змінили сутність процесу створення способів управління силовими напівпровідниковими перетворювачами для систем електропостачання й електроприводу. Різноманітні сучасні теорії потужності базуються на використанні інформації про миттєві значення струмів і напруг трифазної СЕ для отримання відповідних узагальнених векторів в одній з просторових декартових систем координат [69; 90; 113; 118; 122; 126]. Оперування просторовими векторами дає змогу виокремлювати складові миттєвої активної і реактивної потужностей в реальному часі і синтезувати швидкодіючі алгоритми управління перетворювальними системами з близьким до одиниці коефіцієнтом потужності [69; 90; 113; 118; 122; 126]. Розвиток сучасних теорій потужності привів до виникнення нового класу перетворювальних пристроїв – силових активних фільтрів – динамічних напівпровідникових компенсаторів, які забезпечують необхідний рівень електромагнітної сумісності нелінійного навантаження з мережею живлення. Крім того застосування САФ відкрило нові можливості для підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання [2; 69; 90; 122].

Незважаючи на очевидний зв'язок енергоефективності СЕ з положеннями сучасних теорій потужності, закінченої теорії, яка однозначно обумовлює такий взаємозв'язок на сьогодні не існує. Цей розділ присвячено розвитку положень сучасних теорій активної і реактивної потужностей для описання системи складових сумарної потужності втрат, що враховують фізичний зміст електромагнітних процесів у трифазних чотирипровідних системах електропостачання з нелінійним навантаженням, у яких можна використовувати САФ.

Перш ніж розкласти сумарну потужність втрат на окремі складові, обумовлені електромагнітними процесами в трифазній СЕ, необхідно визначити умови, за яких потужність втрат у системі буде мінімальною, а ККД досягне максимально можливого значення.

ККД трифазної СЕ – один із найважливіших параметрів, значення якого визначається відношенням потужності КЗ на затискачах навантаження до корисної середньої активної потужності навантаження, що розраховується в періоді повторюваності. У процесі проектування СЕ

можна підвищити ККД шляхом зменшення щільності струму в кабельній лінії, а також застосувати енергоємні накопичувачі енергії, активні фільтри й альтернативні джерела енергії, що обумовлюють двоспрямований енергетичний потік і зменшення струму споживання від централізованої енергосистеми. Зменшення енергетичних втрат у різних конфігураціях СЕ обумовлюється вимогами до Smart Grid систем [2; 79; 81; 82; 98; 106; 107] і є одним з вагомих чинників для впровадження подібних систем в енергетичну галузь. Мінімізувати втрати енергії в Smart Grid СЕ можна за умови, якщо відомим є значення потужності мінімально можливих втрат для кожного окремого випадку конфігурації такої системи [44]. У цьому підрозділі розглянуто теорему про мінімум втрат енергії, що впливає з аналізу конфігурації еквівалентної схеми трифазної СЕ.

### 2.2.1 Еквівалентна схема трифазної чотирипровідної системи електропостачання з силовим активним фільтром

Складну розгалужену схему трифазної чотирипровідної СЕ можна звести до простої еквівалентної схеми, представленої на рисунку 2.4.

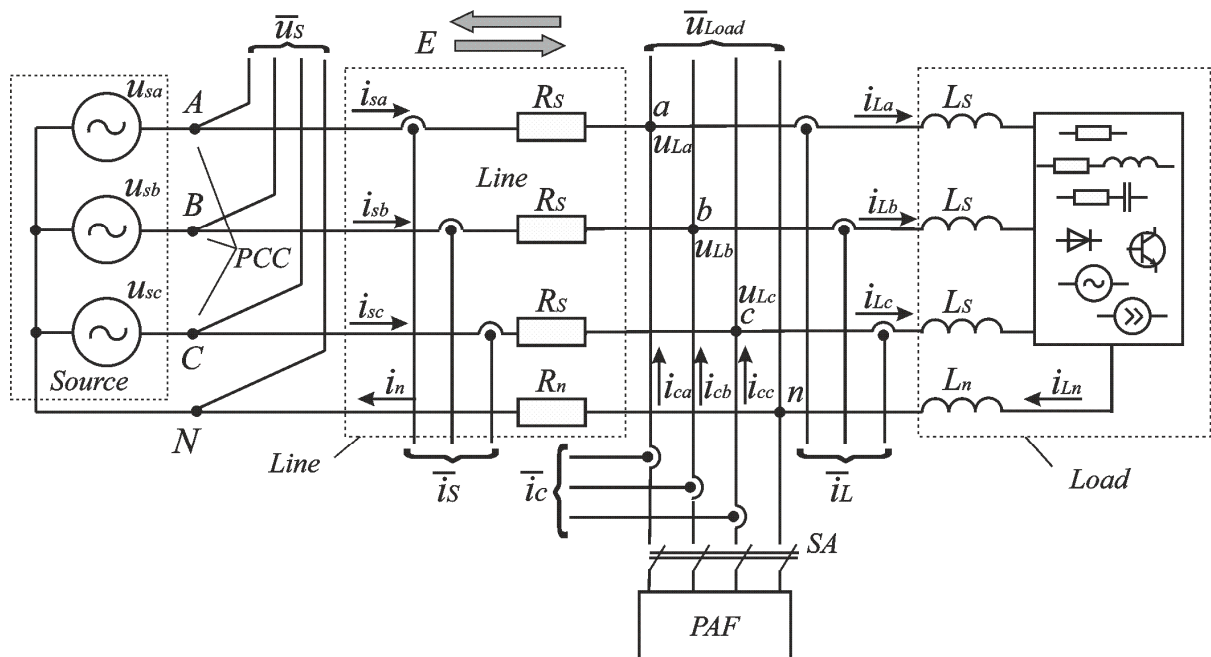


Рисунок 2.4 – Еквівалентна схема трифазної СЕ з САФ

Схема складається з трьох окремих елементів: трифазного джерела (*Source*), навантаження (*Load*) і з'єднувальної живлячої лінії (*Line*) з опором лінійного проводу  $R_s$  і опором нульового проводу  $R_n$ . Для спрощення аналізу індуктивність лінії винесено в навантаження, що, загалом, є допустимою умовою. Миттєві напруги трифазного джерела

можуть мати будь-яку форму (синусоїдальну або несинусоїдальну, без або із гармонічними складовими), навантаження може містити як лінійні, так і нелінійні елементи, а також джерела струму й напруги. Трифазна СЕ за схемою (рис. 2.4) може бути як симетричною, так і несиметричною щодо джерела й навантаження. Енергетичний потік в лінії може бути односпрямованим прямим – із джерела до навантаження, односпрямованим зворотним – із навантаження до джерела і двоспрямованим – поєднувати на періоді повторюваності обидва напрями передачі енергії.

У разі замикання контактора  $SA$  до затискачів навантаження підмикається САФ (блок  $PAF$ ).

Розглянемо еквівалентну схему, коли контактор  $SA$  розімкнений. Із використанням вимірювальної інформації, що знімається з давачів напруги й струму, в просторовій декартовій системі координат абс розраховуються узагальнені тривимірні вектори напруги джерела  $\vec{u}_s$ , напруги навантаження  $\vec{u}_L$ , струму мережі  $\vec{i}_s$  і миттєвої реактивної потужності  $\vec{q}$  [43; 44]:

$$\vec{u}_s = \vec{i} \cdot u_{sa} + \vec{j} \cdot u_{sb} + \vec{k} \cdot u_{sc}, \quad (2.12)$$

$$\vec{u}_L = \vec{i} \cdot u_{La} + \vec{j} \cdot u_{Lb} + \vec{k} \cdot u_{Lc}, \quad (2.13)$$

$$\vec{i}_s = \vec{i} \cdot i_{sa} + \vec{j} \cdot i_{sb} + \vec{k} \cdot i_{sc}, \quad (2.14)$$

$$\vec{q}_S = \vec{u}_S \times \vec{i}_S = \begin{bmatrix} q_{sa} \\ q_{sb} \\ q_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sb} & u_{sc} \\ i_{sb} & i_{sc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sc} & u_{sa} \\ i_{sc} & i_{sa} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sa} & u_{sb} \\ i_{sa} & i_{sb} \end{bmatrix}^T, \quad (2.15)$$

де  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – орти за осями а, b, с декартової системи координат.

Миттєві активні потужності джерела  $p_S$  і навантаження  $p_L$  можуть бути подані, як сума миттєвих потужностей кожної фази СЕ (1.77), (1.78):

$$p_S = u_{sa} \cdot i_{sa} + u_{sb} \cdot i_{sb} + u_{sc} \cdot i_{sc}, \quad (2.16)$$

$$p_L = u_{La} \cdot i_{sa} + u_{Lb} \cdot i_{sb} + u_{Lc} \cdot i_{sc}. \quad (2.17)$$

Інший спосіб подання миттєвих активної і реактивної потужностей пов'язаний із використанням кута зсуву між просторовими векторами напруги та струму:

$$p_S = |\vec{u}_s| \cdot |\vec{i}_s| \cdot \cos \varphi_s, \quad (2.18)$$

$$p_L = |\vec{u}_L| \cdot |\vec{i}_s| \cdot \cos \varphi_L, \quad (2.19)$$

$$|\vec{q}| = |\vec{u}_s| \times |\vec{i}_s| \cdot |\sin \varphi_s|, \quad (2.20)$$

де

$$\cos \varphi_s = \frac{u_{sa}}{|\vec{u}_s|} \cdot \frac{i_{sa}}{|\vec{i}_s|} + \frac{u_{sb}}{|\vec{u}_s|} \cdot \frac{i_{sb}}{|\vec{i}_s|} + \frac{u_{sc}}{|\vec{u}_s|} \cdot \frac{i_{sc}}{|\vec{i}_s|}, \quad (2.21)$$

$$\cos \varphi_L = \frac{u_{La}}{|\vec{u}_L|} \cdot \frac{i_{sa}}{|\vec{i}_s|} + \frac{u_{Lb}}{|\vec{u}_L|} \cdot \frac{i_{sb}}{|\vec{i}_s|} + \frac{u_{Lc}}{|\vec{u}_L|} \cdot \frac{i_{sc}}{|\vec{i}_s|}. \quad (2.22)$$

Загалом значення косинусів у співвідношеннях (2.21), (2.22) відрізняються

$$\cos \varphi_s \neq \cos \varphi_L. \quad (2.23)$$

Варто зазначити, що під час визначення модуля просторового вектора реактивної потужності для розрахування потужності додаткових втрат у СЕ потрібно використовувати вектор напруги джерела, виміряний у точках загального під'єднання навантажень (*PCC*), а не вектор напруги навантаження, бо виникне помилка, оскільки не будуть враховані втрати в резисторах  $R_s$  еквівалентної схеми під час протікання реактивної складової струму.

### 2.2.2 Причини виникнення додаткових втрат енергії в системах електропостачання

Поєднання режимів роботи й параметрів елементів еквівалентної схеми визначає загальна кількість варіантів виникнення потужності втрат у трифазній СЕ ( $N$ ). На рисунку 2.5 подано умовну схему визначення  $N$ . Приймаючи, що параметри живлячої трифазної лінії незмінні, можна виокремити ознаки, що зумовлюють причини виникнення втрат електроенергії, до того ж деякі ознаки будуть загальними для трифазного джерела й навантаження, тоді як інші будуть відрізнятися (рис. 2.5).

Загальною первинною ознакою є симетрія. Вторинною ознакою для джерела слугує синусоїдальність, а для навантаження, як еквівалент, – лінійність. Первинна і вторинна ознаки містять по два протилежні варіанти, які співвідносяться з виконанням або невиконанням умови, що міститься в ознаці ( $N_{s1}$ ,  $N_{s2}$  – для трифазного джерела;  $N_{L1}$ ,  $N_{L2}$  – для навантаження). Третинна ознака визначається характером лінійного навантаження і береться до уваги під час виконання умови «лінійність».

Кількість робочих режимів СЕ відповідно рисунку 2.5 визначається трьома можливими варіантами провідності нульового проводу ( $N_{ESS1}$ ) і трьома варіантами спрямованості потоку енергії ( $N_{ESS2}$ ) (односпрямований прямий, односпрямований зворотний, двоспрямований).



Загальна кількість варіантів виникнення втрат у трифазній СЕ, згідно з рисунком 2.5

$$\begin{aligned}
 N &= N_S \cdot N_L \cdot N_{ESS} = \\
 &= N_{S1} \cdot N_{S2} \cdot N_{L1} \cdot N_{L2} \cdot (N_{L3} - N_{L2} + 1) \cdot N_{ESS1} \cdot N_{ESS2} = \quad (2.24) \\
 &= 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot (3 - 2 + 1) \cdot 3 \cdot 3 = 288.
 \end{aligned}$$

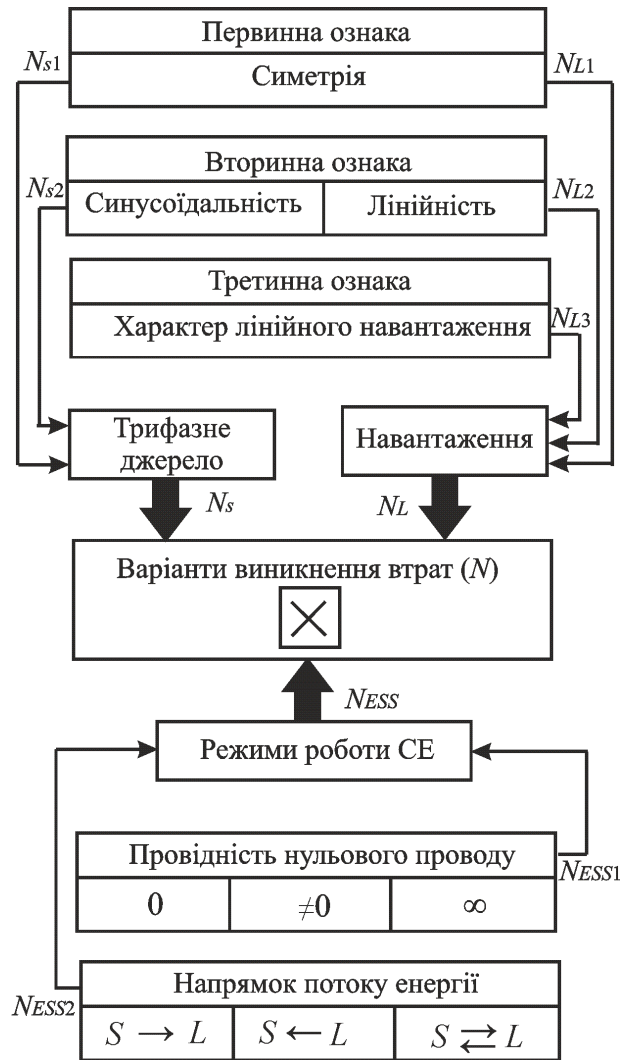


Рисунок 2.5 – Умовна схема визначення кількості варіантів виникнення потужності втрат в СЕ

У дев'яти з 288 варіантів система електропостачання буде працювати з найменшими можливими втратами енергії, що однозначно визначаються відношенням потужності трифазного резистивного короткого замикання  $P_{SC}$  до середньої корисної потужності навантаження  $P_{usf}$  [44]. Зазначені варіанти виникають у разі одночасного забезпечення умов первинної і вторинної ознак як для трифазного джерела, так і для навантаження. Навантаження при цьому має бути резистивним. У 279 варіантах СЕ виникають додаткові втрати, під якими розуміють різницю між сумарною потужністю втрат і мінімально можливою потужністю втрат у трифазній СЕ.

## 2.2.3 Максимально можливий коефіцієнт корисної дії трифазних систем електропостачання

Потужність мінімально можливих втрат (або максимально можливий ККД) у трифазній симетричній системі з резистивним навантаженням у разі постійної корисної потужності  $P_{usf} = \text{const}$  буде залежати від напрямку енергетичного потоку в лінії. Розглянемо два окремі випадки трифазних симетричних СЕ: перший – з односпрямованим прямим енергетичним потоком, другий – з односпрямованим зворотним енергетичним потоком.

На рисунку 2.6, а подано еквівалентну схему трифазної симетричної СЕ з резистивним навантаженням і прямим енергетичним потоком для визначення максимально можливого ККД. Нульовий провід у схемах на рисунку 2.6 не показано, бо в симетричній системі струм у нульовому проводі відсутній. На рисунку також зображено криві миттєвих напруг, струмів для фази А, а також активної корисної потужності двох зазначених режимів.

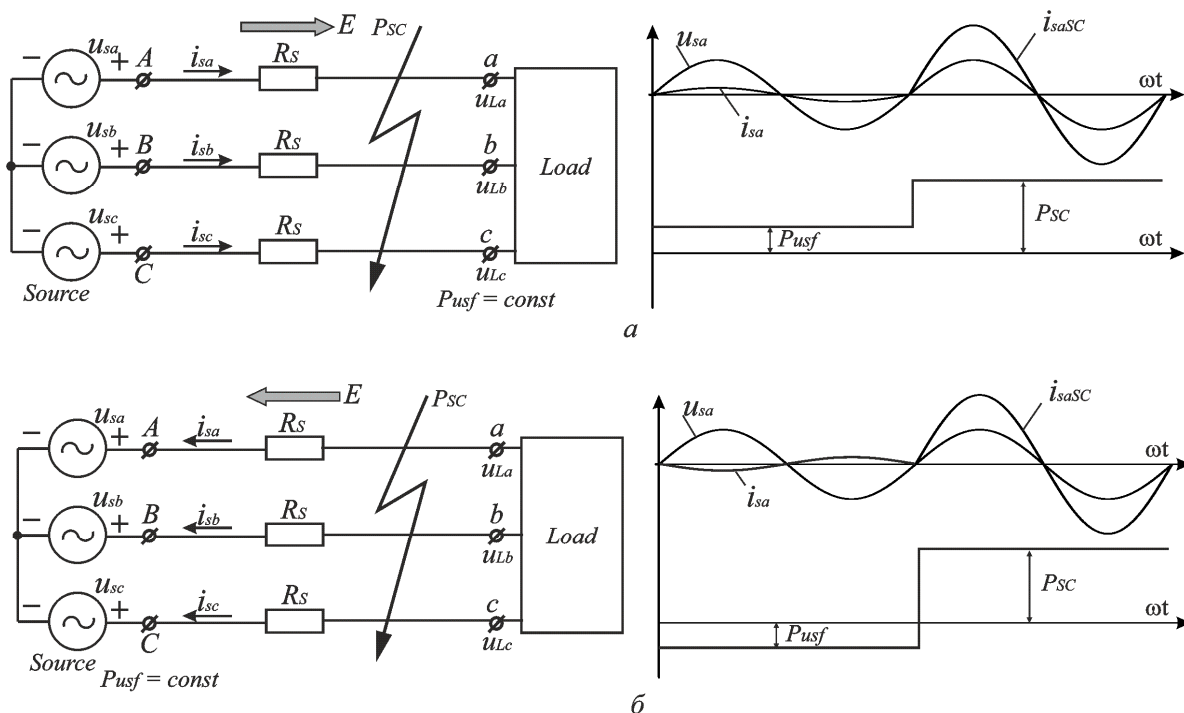


Рисунок 2.6 – Еквівалентна схема трифазної симетричної СЕ:

а – у прямому потоці; б – у зворотному потоці

Потужність трифазного резистивного КЗ визначається на затискачах навантаження:

$$P_{SC} = \frac{3 \cdot U_s^2}{R_s}, \quad (2.25)$$

де  $U_s$  – діюче значення фазної напруги джерела.

Корисна активна потужність є незмінною і позитивною та визначається на затискачах навантаження:

$$P_{usf} = P_s - \Delta P_{\min} = 3 \cdot I \cdot U_s - \Delta P_{\min}, \quad (2.26)$$

де  $I$  – діюче значення лінійного струму.

Мінімально можливу потужність втрат (рисю 2.6) можна записати, як

$$\Delta P_{\min} = 3 \cdot I^2 \cdot R_s. \quad (2.27)$$

Звідси

$$I = \sqrt{\frac{\Delta P_{\min}}{3 \cdot R_s}}. \quad (2.28)$$

Виразимо опір лінії за (2.25)

$$R_s = \frac{3 \cdot U_s^2}{P_{sc}}. \quad (2.29)$$

Підставимо (2.28) і (2.29) у (2.26)

$$P_{usf} = \sqrt{\Delta P_{\min} \cdot P_{sc}} - \Delta P_{\min}. \quad (2.30)$$

Зведемо обидві частини (2.30) у квадрат і розділимо на  $P_{usf}^2$ , після перетворення отримаємо таке квадратне рівняння:

$$\Delta P_{\min}^2 + (2 - k_{sc}) \cdot \Delta P_{\min} + 1 = 0, \quad (2.31)$$

де

$$\Delta P_{\min}^* = \frac{\Delta P_{\min}}{P_{usf}} \quad (2.32)$$

відносно значення мінімально можливої потужності втрат у частках середньої корисної потужності навантаження.

Зважаючи на те, що максимально можливий ККД СЕ зв'язаний з відносною мінімально можливою потужністю втрат,

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + \Delta P_{\min}^*}. \quad (2.33)$$

Підставивши (2.33) у (2.31) і знайшовши корені квадратного рівняння та здійснивши деякі перетворення, отримаємо

$$\eta_{\max \rightarrow} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{k_{sc}}}. \quad (2.34)$$

Позначення  $\eta_{\max \rightarrow}$  вказує на прямий напрям енергетичного потоку з джерела в навантаження.

Розглянемо інший випадок, коли потік енергії спрямований у зворотному напрямі – із навантаження до джерела. На рисунку 2.6

подано відповідну еквівалентну схему, що характеризує цей випадок. У блоці навантаження розташоване трифазне симетричне джерело струму, яке генерує лінійні струми у протифазі з відповідними фазними напругами.

Потужність трифазного резистивного КЗ, як і у попередньому випадку, визначається на затискачах навантаження за співвідношенням (2.25).

Корисна активна потужність є незмінною і негативною та визначається на затискачах джерела напруги (рис. 2.6):

$$P_{usf} = P_s = 3 \cdot I \cdot U_s . \quad (2.35)$$

Підставивши (2.28), (2.29) у (2.35) і здійснивши необхідні перетворення, отримаємо співвідношення для розрахування відносної мінімальної потужності втрат у зворотному потоці:

$$\Delta P_{\min^* \leftarrow} = \frac{1}{k_{sc}} , \quad (2.36)$$

для максимально можливого ККД –

$$\eta_{\max \leftarrow} = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_{sc}}} . \quad (2.37)$$

Максимально можливий ККД для трифазної СЕ з двоспрямованим енергетичним потоком в ідеалізованому випадку, що відповідає незмінному значенню середньої корисної потужності без додаткових втрат (при коефіцієнті повернення енергії  $k_E = 1$ ), можна визначити зі співвідношення

$$\eta_{\max \leftrightarrow} = \frac{\Delta P_{\min \leftarrow *}}{\Delta P_{\min \rightarrow *}} = \frac{1}{k_{sc}} \cdot \frac{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{k_{sc}}}}{\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{k_{sc}}}} , \quad (2.38)$$

де

$$\Delta P_{\min \rightarrow *} = \frac{\Delta P_{\min \rightarrow}}{P_{usf}} = \frac{\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{k_{sc}}}}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{k_{sc}}}} . \quad (2.39)$$

Із (2.35) і (2.36) отримаємо

$$\Delta P_{\min \leftrightarrow *} = k_{sc} \cdot \Delta P_{\min^* \rightarrow} - 1 . \quad (2.40)$$

У таблиці 2.2 подано розраховані за співвідношеннями (2.34), (2.36) – (2.40) значення максимально можливих ККД і відносної потужності мінімально можливих втрат для різних значень коефіцієнта  $k_{sc}$  і трьох варіантів напрямку енергетичного потоку в лінії трифазної СЕ.

На рисунку 2.7 зображено криві, побудовані за співвідношенням, що описує максимально можливий ККД трифазної СЕ у прямому енергетичному потоці, (2.34) для двох діапазонів змінювання коефіцієнта  $k_{sc}$ . На рисунку 2.8 зображено криві, побудовані за співвідношеннями (2.36) – (2.40) при змінюванні коефіцієнта  $k_{sc}$  від 0 до 30.

Таблиця 2.2 – Значення максимально можливих ККД і відносної потужності мінімально можливих втрат для різних значень коефіцієнта  $k_{sc}$  і трьох варіантів напрямку енергетичного потоку

Односпрямований прямий енергетичний потік																
$P_{sc}/P_{usf}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$\eta_{\max \rightarrow}$	0,5	0,789	0,854	0,887	0,909	0,923	0,933	0,941	0,947	0,958	0,965	0,974	0,980	0,983	0,986	0,99
$\Delta P_{\min \rightarrow}^*$	1	0,276	0,171	0,127	0,101	0,083	0,072	0,063	0,056	0,043	0,036	0,026	0,021	0,017	0,014	0,01
Односпрямований зворотний енергетичний потік																
$P_{sc}/P_{usf}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$\eta_{\max \leftarrow}$	0,8	0,857	0,889	0,909	0,923	0,933	0,941	0,947	0,952	0,962	0,968	0,976	0,98	0,984	0,987	0,99
$\Delta P_{\min \leftarrow}^*$	0,25	0,167	0,125	0,1	0,083	0,071	0,063	0,056	0,05	0,04	0,033	0,025	0,02	0,017	0,013	0,01
Двоспрямований енергетичний потік																
$P_{sc}/P_{usf}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$\eta_{\max \leftrightarrow}$	—	0,622	0,729	0,787	0,825	0,851	0,871	0,885	0,897	0,918	0,932	0,949	0,96	0,966	0,973	0,98
$\Delta P_{\min \leftrightarrow}^*$	—	0,608	0,373	0,27	0,212	0,175	0,149	0,129	0,115	0,089	0,073	0,053	0,042	0,035	0,028	0,021

У 279 з 288 варіантів СЕ, крім мінімально можливих втрат, виникають додаткові втрати, потужність яких визначається особливостями електромагнітних процесів. Сучасні теорії миттєвих активної і реактивної потужностей дають змогу виокремити базові індикатори причин виникнення додаткових втрат у трифазній СЕ. Насамперед, це пульсації графіка миттєвої активної потужності [46], а також наявність у СЕ розрахункової миттєвої реактивної потужності [48]. У разі, якщо СЕ чотирипровідна та порушені умови первинної і вторинної ознак, з'являється четверта складова сумарної потужності втрат, обумовлена протіканням струму в нульовому проводі.

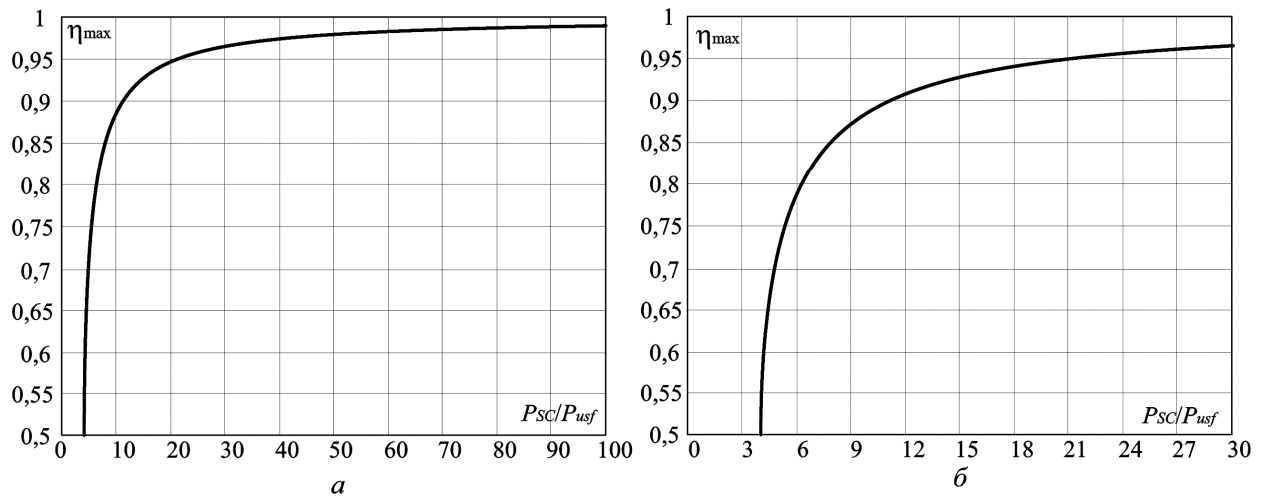


Рисунок 2.7 – Залежність максимально можливого ККД у прямому енергетичному потоці від відношення  $P_{sc}/P_{usf}$

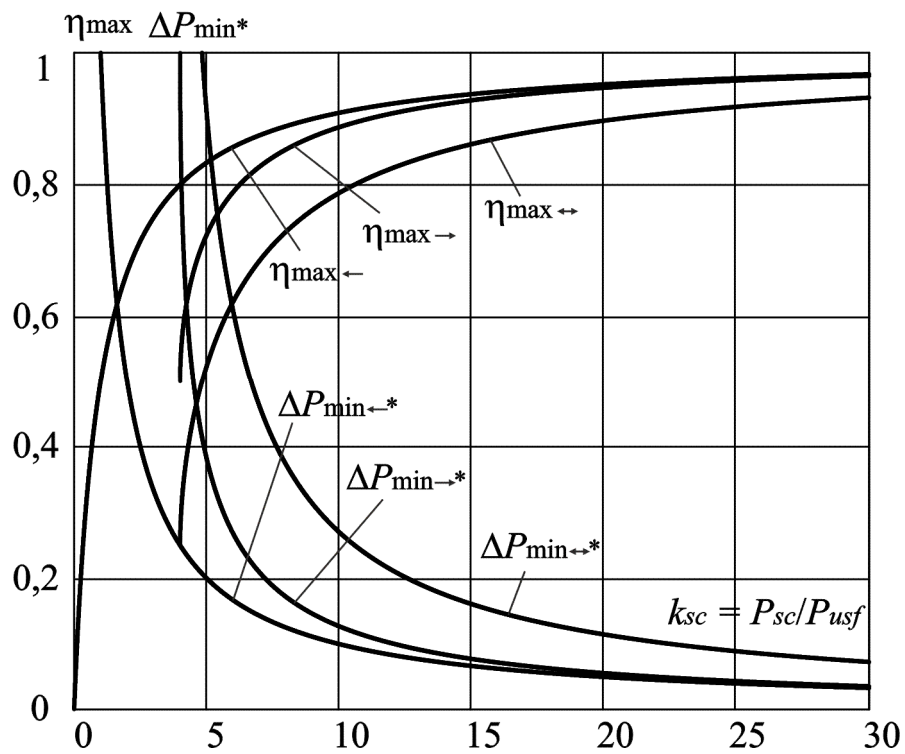


Рисунок 2.8 – Залежності максимально можливого ККД і відносної мінімально можливої потужності втрат у трифазних СЕ для трьох варіантів напрямку енергетичного потоку від коефіцієнта  $k_{sc}$

## 2.2.4 Формулювання теореми про мінімум втрат енергії в трифазних системах електропостачання

Точні співвідношення (2.34), (2.36) – (2.40) уможливають висновок про те, що відносна потужність мінімально можливих втрат, а також максимально можливий ККД трифазної симетричної СЕ з синусоїдальними напругами джерела однозначно визначаються відношенням потужності трифазного резистивного КЗ до середньої корисної потужності навантаження.

Якщо прийняти, що в схемі (рис. 2.4) напруги трифазного джерела є синусоїдальними й симетричними, а САФ – ідеальним джерелом струму, то після замикання контактора SA в СЕ встановиться режим роботи, який відповідає мінімальній потужності втрат, або максимально можливому ККД. Можна припустити наявність подібного режиму для будь-якої трифазної СЕ, що дає змогу сформулювати теорему про мінімум потужності втрат енергії в трифазних СЕ: **«У трифазній системі електропостачання мінімальні втрати енергії  $\Delta P_{\min}^*$ , тобто максимально можливий ККД  $\eta_{\max}$ , однозначно визначаються відношенням потужності резистивного короткого замикання на затискачах навантаження до корисної потужності, що дорівнює середньому значенню потужності навантаження, обчисленому в періоді повторюваності».**

Додатковим доказом цієї теореми може слугувати визначення складових сумарної потужності втрат у трифазній СЕ з використанням мінімально можливої потужності втрат, а також потужностей додаткових втрат, обумовлених фізичними причинами їхнього виникнення. Трифазна чотирипровідна СЕ буде працювати в режимі з мінімально можливими втратами енергії за таких умов: напруги трифазного джерела синусоїдальні й симетричні; навантаження симетричне й резистивне; пульсації в кривій миттєвої активної потужності відсутні; параметри кабелю живлячої лінії незмінні; струм у нульовому проводі відсутній. У разі порушення будь-якої з цих умов у СЕ виникають додаткові втрати енергії. У цьому розділі показано, як кожна складова потужності додаткових втрат пов'язана з відповідною причиною, що їх обумовлює.

## 2.3 Енергозберігаючий ефект компенсації пульсацій миттєвої активної потужності

Системи комунального електропостачання 10(6)/0,4 кВ – найрозгалуженіші й найдовші електричні мережі. Вони є завершальною

ланкою в технологічному ланцюзі передачі електроенергії від електричних станцій до споживачів, ефективність функціонування якої визначає якість і надійність електропостачання. Для комунальних мереж, що характеризуються порівняно низьким коефіцієнтом корисної дії, особливо актуальною є проблема мінімізації втрат електроенергії на її шляху до кінцевого споживача. Домогтися істотного зменшення втрат, а отже, підвищити сумарний ККД системи електропостачання можна за допомогою таких технічних рішень: компенсувати середнє значення реактивної потужності, компенсувати пульсації миттєвої реактивної потужності, компенсувати пофазну асиметрію фазних мережевих струмів і струму в нульовому проводі, нейтралізувати вищі гармоніки мережевих струмів, а також компенсувати пульсації миттєвої активної потужності. Із всіх лічених вище способів підвищення ККД зазвичай використовують лише один – компенсування середньої реактивної потужності шляхом установлення пасивних фільтрокомпенсуючих пристроїв із конденсаторними батареями. Однак, як показали теоретичні дослідження [13; 35; 46], значні додаткові втрати в системі комунального електропостачання спричиняє не тільки середня реактивна потужність, але й пульсації в графіках реактивної та активної потужностей. Компенсувати миттєву реактивну потужність, тобто її постійну і змінну складові одночасно можна шляхом застосування силових активних фільтрів без накопичувача енергії, установленням їх на введеннях в об'єкти електропостачання або на трансформаторних підстанціях. Щоб компенсувати пульсації активної потужності, потрібен САФ із накопичувачем або додатковим джерелом енергії. Доцільність компенсації пульсацій активної потужності було встановлено під час дослідження графіків активної потужності житлового будинку. Коливання активної потужності спостерігаються як протягом тривалого періоду (добові коливання графіка споживаної енергії), так і протягом менших періодів часу, що становлять години або навіть хвилини.

У підрозділі розглянуто можливості підвищення ККД системи електропостачання в разі компенсування пульсацій миттєвої активної потужності, що різняться кількома різними за частотою складовими, які накладаються одна на одну. Отримані результати поширюються і на пульсації реактивної потужності.

Під час аналізу впливу пульсацій миттєвої активної потужності на ККД системи енергопостачання допускається, що в системі попередньо



були компенсовані реактивна потужність, асиметрія струмів навантаження й вищі гармоніки мережових струмів, а також струм в нульовому проводі.

Просторові вектори струму, напруги джерела й навантаження можна подати в декартових координатах  $abc$  відповідно (2.12) – (2.14).

Еквівалентну схему трифазної симетричної системи електропостачання, запропоновану й обґрунтовану в [13], наведено на рисунку 2.9.

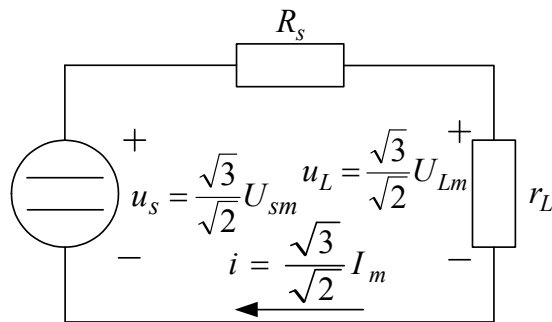


Рисунок 2.9 – Еквівалентна схема трифазної системи електропостачання

Вважатимемо, що модуль просторового вектора напруги  $u_s$ , а також внутрішній опір джерела  $R_s$  незмінні в часі

$$u_s = U_s = \text{const}, \quad (2.41)$$

$$R_s = \text{const}, \quad (2.42)$$

а опір навантаження  $i$ , отже, модуль струму навантаження є функціями часу з деяким періодом повторюваності:

$$r_L = f_1(t) = f_1(t + T), \quad (2.43)$$

$$i = \frac{u_s}{R_s + r_L} = f_2(t) = f_2(t + T), \quad (2.44)$$

де  $t$  – час.

### 2.3.1 Одна пульсація активної потужності

Графік миттєвої активної потужності навантаження визначається технологічним процесом  $i$ , загалом, є випадковою функцією часу. У підрозділі розглядається окремий випадок, коли графік потужності детермінований і може бути представлений як сума постійної складової й гармонійних коливань різної частоти, що накладаються.

Вважатимемо, що у випадку пульсації тільки однієї частоти графік миттєвої активної потужності буде таким:

$$p_{L1} = P_{usf} \left( 1 + \Delta_1 \sin \frac{2\pi}{T_1} t \right), \quad (2.45)$$

у відносних одиницях –

$$p_{L1*} = \frac{p_{L1}}{P_{usf}} = \left( 1 + \Delta_1 \sin \frac{2\pi}{T_1} t \right), \quad (2.46)$$

де  $P_{usf}$  – корисна активна середня потужність навантаження, обчислена в періоді повторюваності  $T_1$ ,

$$0 \leq \Delta_1 \leq 1. \quad (2.47)$$

Як вихідну розрахункову величину введемо також потужність активного КЗ джерела відповідно (1.28).

Шляхом нескладних перетворень, наведених в [13], отримаємо співвідношення для визначення миттєвого значення струму навантаження:

$$i = \frac{U_s}{2R_s} \left( 1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{p_{L\Sigma*}}{k_{sc}}} \right), \quad (2.48)$$

де  $p_{L\Sigma*}$  – сумарна миттєва активна потужність навантаження в частках  $P_{usf}$ . Коефіцієнт  $k_{sc}$  визначається за (1.29).

ККД системи електропостачання визначається за співвідношенням, еквівалентним відповідним співвідношенням у [13]:

$$\eta = 1 - \frac{\frac{1}{2} \int_0^{T_1} \left( 1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{p_{L\Sigma*}}{k_{sc}}} \right)^2 dt}{\int_0^{T_1} \left( 1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{p_{L\Sigma*}}{k_{sc}}} \right) dt}. \quad (2.49)$$

Як зрозуміло зі співвідношення (2.49), ККД системи електропостачання не залежить від частоти пульсацій миттєвої активної потужності.

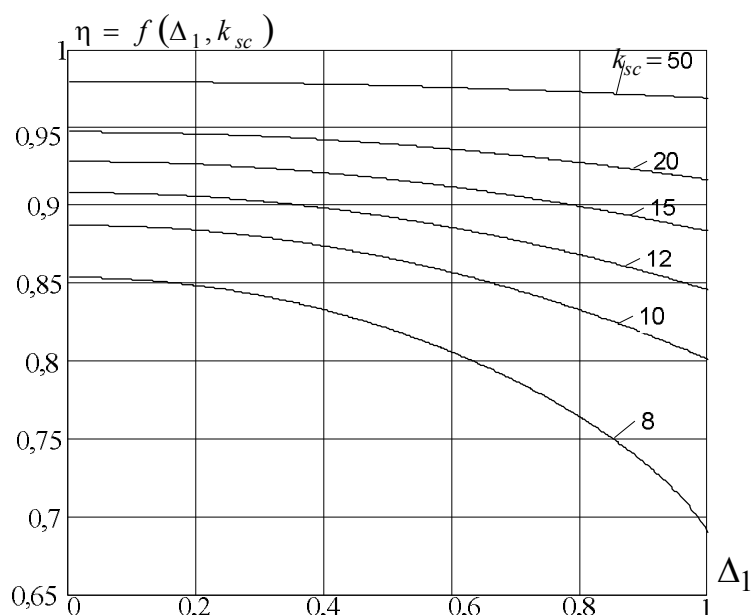
У таблиці 2.3 наведено результати розрахунків ККД за (2.49), а на рисунку 2.10 подано залежності  $\eta = f(\Delta_1, k_{sc})$ .

### 2.3.2 Накладення двох пульсацій активної потужності

Розглянемо випадок накладення двох пульсацій миттєвої активної потужності різної частоти. Низькочастотна крива з періодом повторюваності  $T_1$ , що визначається виразом за (2.46), промодульована частотою, яка у багато разів перевищує першу ( $T_1 \gg T_2$ ) (рис. 2.11).

Таблиця 2.3 – Залежність  $\eta = f(\Delta_1, k_{sc})$ 

$\Delta_1$	$k_{sc}$					
	8	10	12	15	20	50
0	0,854	0,887	0,908	0,928	0,947	0,980
0,1	0,852	0,886	0,908	0,928	0,947	0,980
0,2	0,849	0,884	0,906	0,926	0,946	0,979
0,3	0,842	0,880	0,903	0,924	0,944	0,979
0,4	0,833	0,874	0,898	0,921	0,942	0,978
0,5	0,821	0,866	0,892	0,917	0,939	0,977
0,6	0,805	0,857	0,886	0,912	0,936	0,976
0,7	0,787	0,845	0,877	0,906	0,932	0,974
0,8	0,764	0,832	0,868	0,899	0,927	0,973
0,9	0,734	0,818	0,857	0,892	0,922	0,971
1,0	0,688	0,801	0,846	0,883	0,916	0,969

Рисунок 2.10 – Залежність  $\eta = f(\Delta_1, k_{sc})$ 

Середнім за період повторюваності значенням активної потужності для пульсації більшої частоти є миттєве значення першої пульсації, тобто в періоді високої частоти першу криву потужності вважатимемо незмінною в часі. Уведемо дві додаткові умови: амплітуда змінної складової активної потужності не може перевищувати її середнє значення більше ніж в два рази; миттєве значення сумарної активної потужності є позитивним протягом усього періоду повторюваності.

Тоді поточне значення амплітуди другої складової графіка потужності визначається за такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned}\Delta_2 &= 2 - p_{L1*} \quad \text{при} \quad p_{L1*} > 1, \\ \Delta_2 &= p_{L1*} \quad \text{при} \quad p_{L1*} < 1,\end{aligned}\tag{2.50}$$

а сама друга складова активної потужності

$$p_{L2*} = \Delta_2 \sin \frac{2\pi}{T_2} t.\tag{2.51}$$

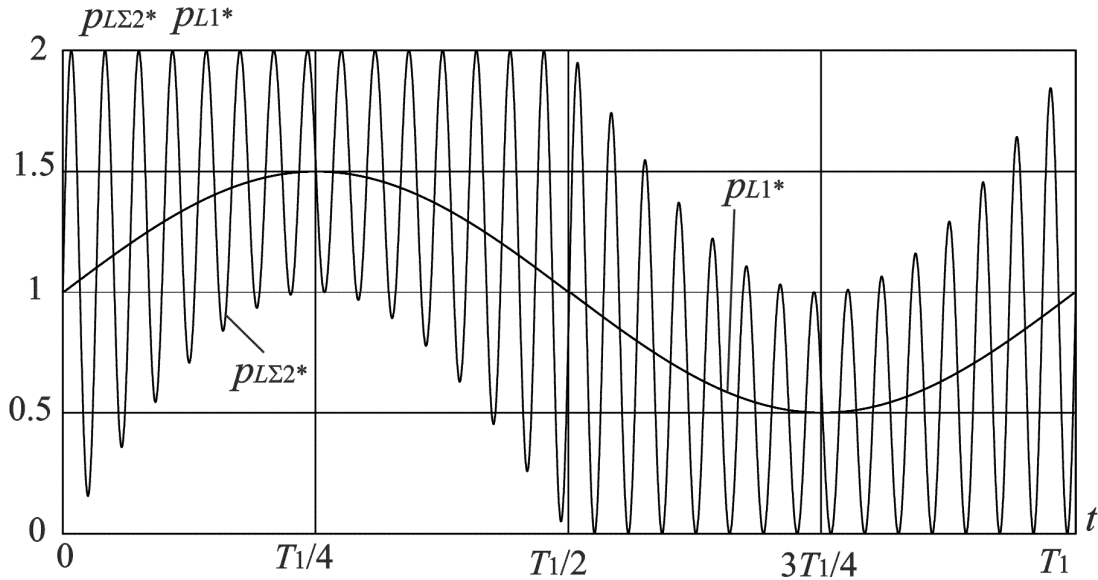


Рисунок 2.11 – Накладення двох пульсацій

Із (2.46), (2.50), (2.51) отримаємо співвідношення для сумарної активної потужності при накладенні двох пульсацій:

$$p_{L\Sigma 2*} = p_{L1*} + p_{L2*} = \begin{cases} 1 + \Delta_1 \sin \frac{2\pi}{T_1} t + \left( 1 - \Delta_1 \sin \frac{2\pi}{T_1} t \right) \sin \frac{2\pi}{T_2} t_1 & \text{якщо } p_{L1*} \geq 1 \\ 1 + \Delta_1 \sin \frac{2\pi}{T_1} t + \left( 1 + \Delta_1 \sin \frac{2\pi}{T_1} t \right) \sin \frac{2\pi}{T_2} t_1 & \text{якщо } p_{L1*} \leq 1 \end{cases}.\tag{2.52}$$

Графік сумарної миттєвої активної потужності при накладенні двох пульсацій, поданий на рисунку 2.11, розраховано за (2.52).

Якщо відношення періодів двох складових пульсацій активної потужності  $T_1/T_2$  дорівнює цілому числу, то середнє значення другої складової обчислюється в таких інтервалах часу:

$$\begin{aligned}0 &\leq t \leq T_1, \\ kT_2 &\leq t \leq (k+1)T_2,\end{aligned}\tag{2.53}$$

де

$$k = 0, 1, 2, \dots, \frac{T_1}{T_2}\tag{2.54}$$

дорівнюватиме нулю:

$$\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} p_{L2} * dt = \frac{1}{T_2} \int_{kT_2}^{(k+1)T_2} p_{L2} * dt = 0. \quad (2.55)$$

У таблиці 2.4 подано результати розрахунків ККД за співвідношеннями (2.49), (2.52), а на рисунку 2.12 – залежності  $\eta = f(\Delta_1, k_{sc})$ , що відповідають даним таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Залежність  $\eta = f(\Delta_1, k_{sc})$  у разі накладення двох пульсацій

$\Delta_1$	$k_{sc}$					
	8	10	12	15	20	50
0	0,688	0,801	0,846	0,883	0,916	0,969
0,1	0,712	0,811	0,853	0,888	0,920	0,970
0,2	0,724	0,817	0,858	0,892	0,922	0,971
0,3	0,729	0,821	0,861	0,894	0,924	0,972
0,4	0,731	0,823	0,862	0,895	0,925	0,972
0,5	0,729	0,822	0,861	0,895	0,924	0,972
0,6	0,723	0,819	0,859	0,893	0,923	0,971
0,7	0,714	0,814	0,855	0,890	0,921	0,971
0,8	0,701	0,806	0,850	0,886	0,918	0,969
0,9	0,681	0,796	0,842	0,880	0,915	0,968
1	0,647	0,782	0,832	0,874	0,909	0,967

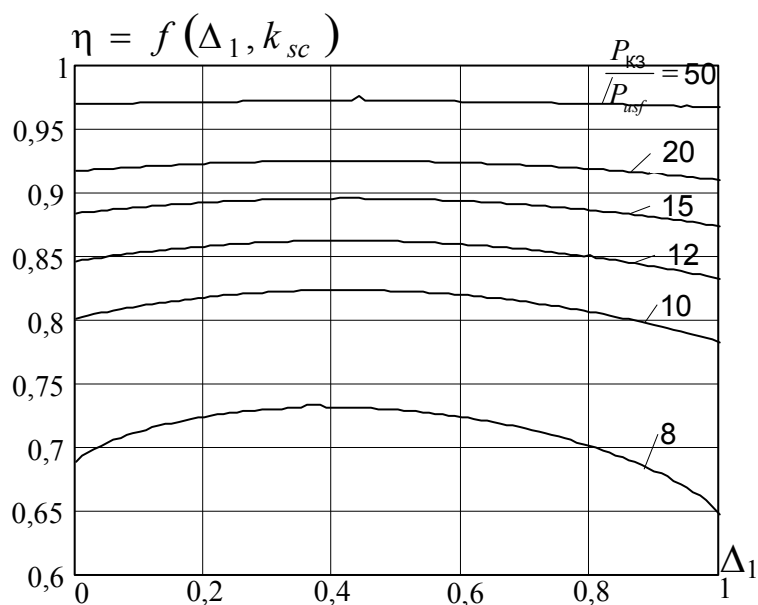


Рисунок 2.12 – Залежність  $\eta = f(\Delta_1, k_{sc})$  у разі накладення двох пульсацій

Із порівняльного аналізу таблиць 2.3 і 2.4 зрозуміло, що ККД системи енергопостачання в разі накладення двох пульсацій різної частоти в графіку активної потужності істотно знижується, якщо  $P_{K3}/P_{usf} \leq 20$ , при  $P_{K3}/P_{usf} = 50$  – зниження ККД є незначним.

### 2.3.3 Накладення трьох пульсацій активної потужності

Накладення трьох пульсацій миттєвої активної потужності різних частот розглядаємо за тих самих припущень і обмежень, що й при накладанні двох пульсацій.

Відносна амплітуда третьої пульсації миттєвої активної потужності з найбільшою частотою ( $T_3 \ll T_2 \ll T_1$ )  $\Delta_3$  визначається за різними формулами, аналогічними до (2.50), залежно від значення сумарної активної потужності першої і другої пульсацій (див. (2.52)):

$$\Delta_3 = \begin{cases} 2 - p_{L\Sigma 2*} & \text{якщо } p_{L\Sigma 2*} \geq 1, \\ p_{L\Sigma 2*} & \text{якщо } p_{L\Sigma 2*} \leq 1. \end{cases} \quad (2.56)$$

Третя складова миттєвої активної потужності

$$p_{L3*} = \Delta_3 \sin \frac{2\pi}{T_3} t. \quad (2.57)$$

Сумарна миттєва потужність у разі накладенні двох пульсацій –

$$p_{L\Sigma 3*} = p_{L\Sigma 2*} + p_{L3*}. \quad (2.58)$$

Графік розраховується за співвідношеннями (2.58), (2.57), (2.56), (2.52), (2.51), (2.50), (2.46) відповідно до такого алгоритму:

1. За (2.46), (2.50), (2.51), (2.52) розраховується і запам'ятовується графік  $p_{L\Sigma 2*}$  в інтервалі часу  $0 \leq t \leq T_1$ .

2. Визначаються моменти часу  $t = 0, t_1, t_2, \dots, t_n, T_1$ , у які графік  $p_{L\Sigma 2*}$  перетинає пряму  $p_{L\Sigma 2*} = 1$ . До того ж точки на осі абсцис  $0, t_2, t_4, t_6, \dots$  будуть відповідати початковим інтервалам часу, коли  $p_{L\Sigma 2*} > 1$ , а точки  $t_1, t_3, t_5, \dots$  – початкам інтервалів часу, коли  $p_{L\Sigma 2*} \leq 1$ .

3. У всіх інтервалах часу, обчислених у п. 2,  $p_{L3*}$  визначається за співвідношеннями (2.57), (2.56).

4. Підсумовуючи  $p_{L\Sigma 2*}$  і  $p_{L3*}$  відповідно до співвідношення (2.58), визначаємо графік сумарної миттєвої активної потужності при накладенні трьох пульсацій.

Залежність  $\eta = f(\Delta_1, k_{sc})$ , побудовану з використанням зазначеного вище алгоритму, подано на рисунку 2.13.

Маючи графік  $p_{L\Sigma 3^*}$ , шляхом підстановки у співвідношення (2.49)

$$p_{L\Sigma^*} = p_{L\Sigma 3^*}. \quad (2.59)$$

визначаємо ККД системи електропостачання.

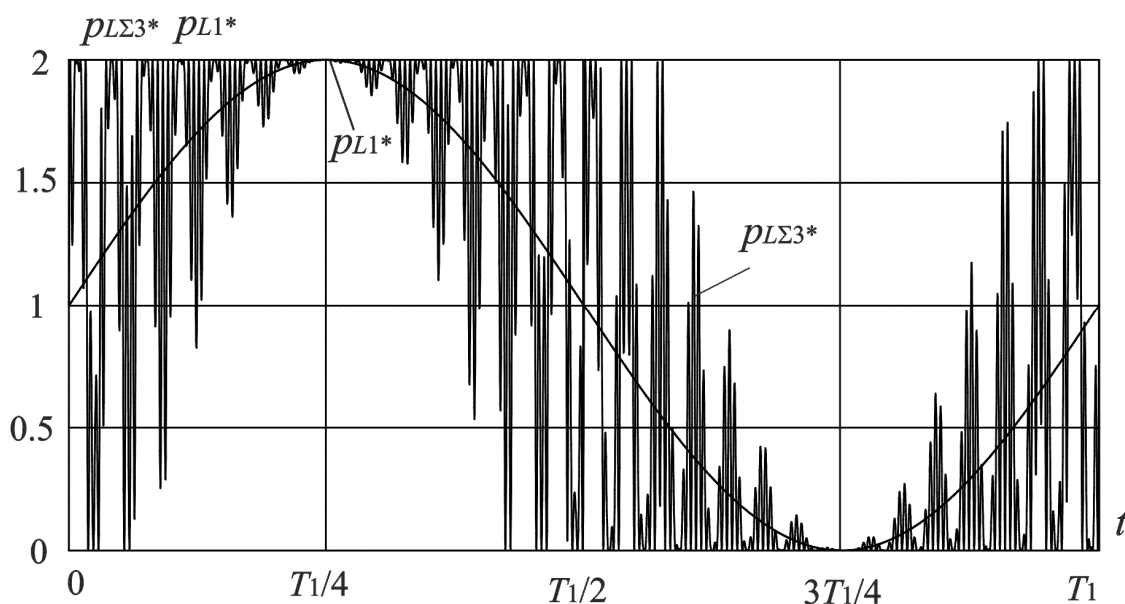


Рисунок 2.13 – Накладення трьох пульсацій

Результати розрахунків ККД у разі накладення трьох пульсацій наведені в таблиці 2.5 і на рисунку 2.14.

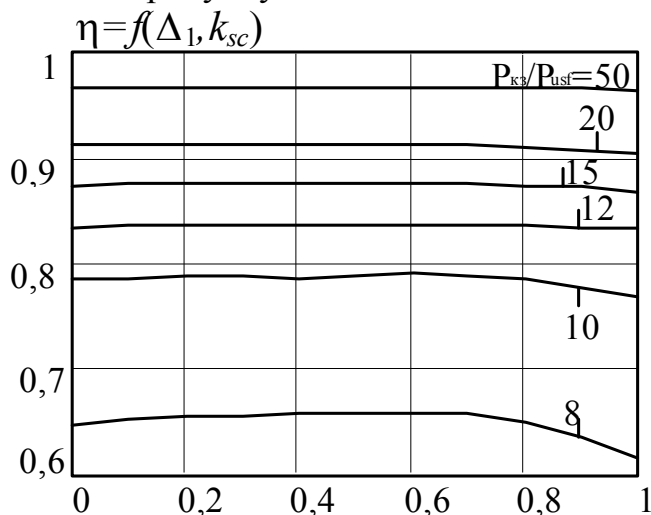


Рисунок 2.14 – Залежність  $\eta = f(\Delta_1, k_{sc})$  у разі накладення трьох пульсацій

Аналіз таблиць 2.4, 2.5 і рисунків 2.12, 2.14 доводить, що накладення третьої пульсації активної потужності при  $8 \leq k_{sc} \leq 15$  призводить до зниження ККД системи електропостачання на 7,7 – 1 %, дл того ж зниження ККД тим менше, чим більше  $k_{sc}$ . При  $k_{sc} = 20$  максимальне зниження ККД унаслідок появи третьої пульсації становить 1,3 %, а при  $k_{sc} = 50$  – 0,5 %.

Таблиця 2.5 – Залежність  $\eta = f(\Delta_1, k_{sc})$  у разі накладення трьох пульсацій

$\Delta_1$	$k_{sc}$					
	8	10	12	15	20	50
0	0,645	0,783	0,833	0,851	0,910	0,967
0,1	0,652	0,785	0,834	0,875	0,911	0,967
0,2	0,654	0,786	0,835	0,875	0,911	0,967
0,3	0,654	0,786	0,835	0,875	0,911	0,967
0,4	0,654	0,786	0,835	0,875	0,911	0,967
0,5	0,657	0,787	0,835	0,876	0,911	0,967
0,6	0,658	0,788	0,836	0,876	0,911	0,967
0,7	0,656	0,787	0,835	0,876	0,911	0,967
0,8	0,649	0,783	0,833	0,874	0,910	0,967
0,9	0,635	0,777	0,828	0,870	0,907	0,966
1	0,614	0,767	0,821	0,865	0,904	0,964

Під час оцінювання енергетичної ефективності компенсації пульсацій активної потужності необхідно оцінити можливість підвищення ККД системи електропостачання внаслідок повної компенсації пульсацій.

Для цього потрібно визначити різницю значень ККД в першому рядку таблиці 2.3, тобто – за відсутності пульсацій, і значень ККД в таблиці 2.5 – за наявності трьох складових пульсацій. Результати цих розрахунків ілюструють криві, зображені на рисунку 2.15. За рисунком 2.15 зрозуміло, що при характерному для Smart Grid мереж електропостачання значенні  $k_{sc} = 15$  компенсація пульсацій активної потужності може дати граничний ефект підвищення ККД у 5 %. На рисунку 2.15 також наведено криві, що дають змогу оцінити можливість підвищення ККД при компенсації двох пульсацій активної потужності.

Зазначимо, що прийнята в підрозділі форма графіків активної потужності дає змогу оцінити граничні значення підвищення ККД. Точна оцінка ККД системи електропостачання передбачає вимірювання і статистичне оброблення реальних графіків активної потужності, а також подальше розрахування ККД за допомогою математичної моделі.

Комп'ютерну Matlab-модель для перевірки енергозберігаючого ефекту від компенсації пульсацій миттєвої активної потужності, а також результати моделювання на моделі розглянуто у підрозділі 5.2.



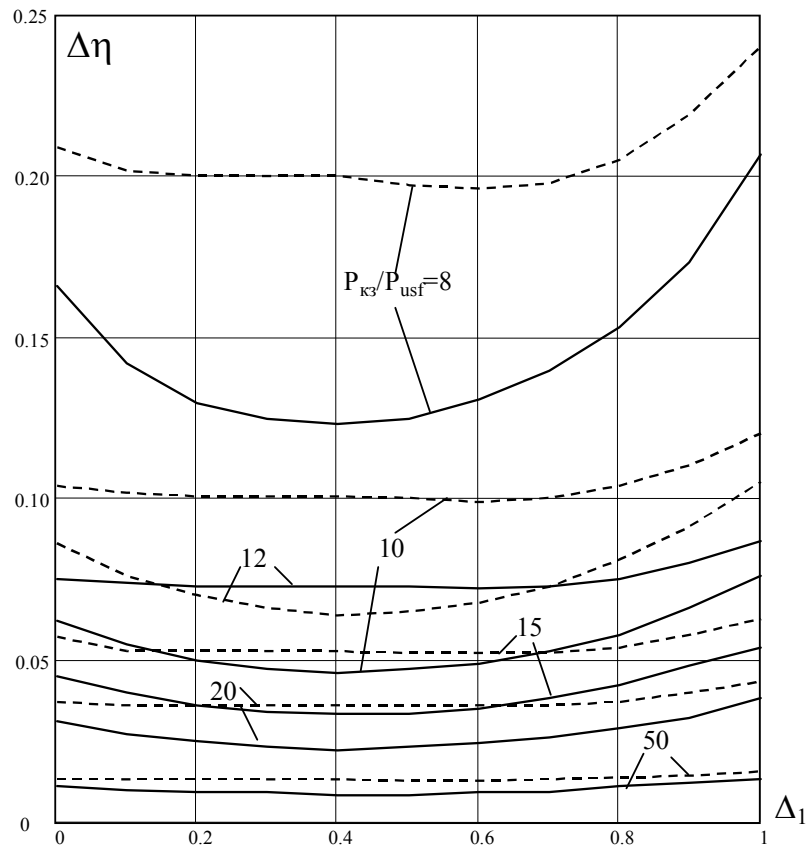


Рисунок 2.15 – Можливість підвищення ККД при компенсації пульсацій активної потужності  
 — — — — — дві пульсації; — — — — — три пульсації

## 2.4 Взаємозв'язок модуля миттєвої реактивної потужності з коефіцієнтом корисної дії системи електропостачання

Тривалий (більш 90 років) період розвитку теорії потужності СЕ з нелінійним навантаженням [14; 28; 31; 92; 93; 94; 100; 105; 110; 113; 118; 122; 123], започаткований працями S. I. Budeanu [100] і S. Fryze [105], завершився прийняттям чіткого математичного визначення миттєвої активної потужності, як миттєвої швидкості передачі енергії в системі електропостачання й «миттєвої реактивної потужності» як розрахункової величини [28; 14; 31; 92; 94; 110; 113; 118; 122; 123]. У [31] доведено, що поняття «реактивна енергія» не має фізичного підґрунтя і що реактивна енергія фізично не існує, оскільки не існує накопичувачів реактивної енергії. Проте очевидно, що розрахункова величина реактивної потужності опосередковано визначає енергію втрат і ККД СЕ. Отже теоретичний і практичний інтерес становить дослідження залежності миттєвого значення модуля реактивної потужності від миттєвого ККД.

## 2.4.1 Миттєві активна й реактивна потужності в системі електропостачання

На рисунку 2.16 як приклад наведено трифазну чотирипровідну СЕ, що є типовою для комунальних споживачів.

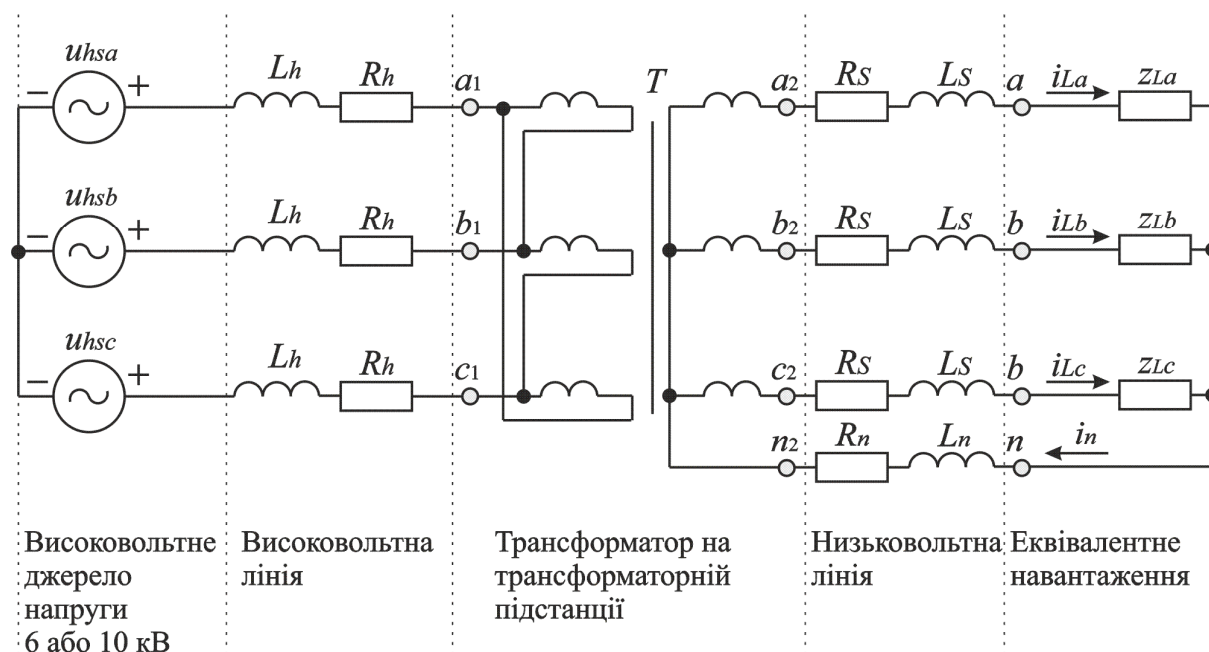


Рисунок 2.16 – Трифазна чотирипровідна СЕ

Від високовольтної мережі 6 або 10 кВ живиться первинна обмотка трансформатора  $T$ , встановленого на трансформаторній підстанції. Довжина високовольтної лінії, зазвичай становить декілька кілометрів, до того ж до неї підімкнено декілька трансформаторних підстанцій. Для кожної підстанції можна розрахувати омичні опори лінії  $R_h$  і еквівалентну індуктивність  $L_h$  (див. рис. 2.16). Припустивши, що напруги високовольтної мережі  $u_{hsa}$ ,  $u_{hsb}$ ,  $u_{hsc}$  симетричні і синусоїдальні, підсумувавши омичні опори, а також індуктивності лінії та обмоток трансформатора, можна перейти від схеми рисунка 2.16 до схеми, наведеної на рисунку 2.17.

В еквівалентній схемі

$$R_{S\Sigma a} = R_{S\Sigma b} = R_{S\Sigma c} = R_{S\Sigma}, \quad (2.60)$$

$$L_{S\Sigma a} = L_{S\Sigma b} = L_{S\Sigma c} = L_{S\Sigma}, \quad (2.61)$$

але опори навантаження не однакові й нелінійні.

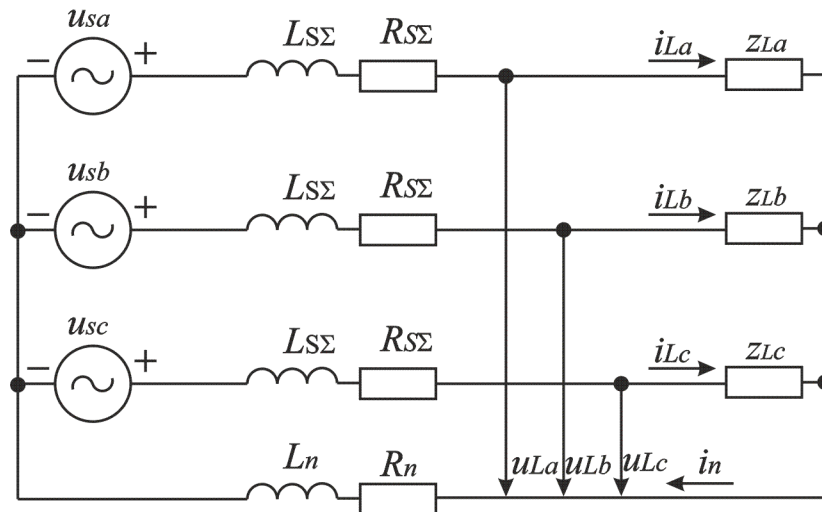


Рисунок 2.17 – Еквівалентна схема трифазної чотирипровідної СЕ

Відзначимо особливості розглядуваної СЕ: для вимірювання напруг доступні клеми  $a_1, b_1, c_1$  або  $a_2, b_2, c_2$  або  $a, b, c$  (див. рис. 2.16), можна, також, виміряти значення миттєвих струмів навантаження  $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ .

Основне призначення будь-якої СЕ – передача електроенергії від одного елемента схеми до іншого, наприклад, від трифазного джерела напруги до навантаження, або в зворотньому напрямі. Важливо зазначити, що трифазне джерело, як і трифазне навантаження, варто вважати єдиними, цілими елементами СЕ. Це означає, що повністю інформація про режим роботи елемента системи електропостачання в будь-який момент часу міститься в параметрах тривимірних просторових векторів напруги й струму. Наприклад, вектори напруги й струму джерела в еквівалентній схемі визначаються за співвідношеннями (2.12) і (2.14), а вектори напруги і струму навантаження визначаються за співвідношенням (2.13) і (2.14).

На рисунку 2.18 зображено просторові вектори напруги й струму для еквівалентної схеми відповідно до рисунка 2.17.

Відповідно до [28; 14; 31; 92; 113; 118], миттєву активну потужність трифазного джерела можна визначити через миттєві значення фазних напруг і струмів, як у (2.16), або через модулі просторових векторів напруги і струму, як у (2.18).

Як впливає з рисунку 2.18, у площині, що проходить через вектори  $\vec{u}_S$  і  $\vec{i}_L$ , кут  $\varphi$  – це найменший кут між зазначеними векторами.

Вектор миттєвої реактивної потужності  $\vec{q}$  визначається через проекції векторів напруги й струму на осі  $a, b, c$  відповідно до (2.15), або як векторний добуток просторових векторів напруги й струму:

$$\vec{q}_S = \vec{u}_S \times \vec{i}_L. \quad (2.62)$$

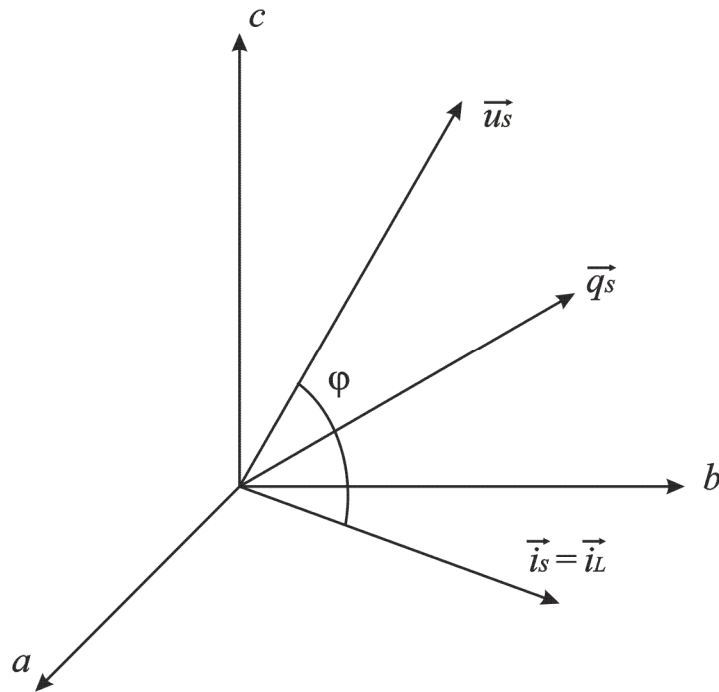


Рисунок 2.18 – Просторові вектори трифазної СЕ

Модуль вектора миттєвої реактивної потужності [31] –

$$q = \sqrt{\begin{vmatrix} u_{sb} & u_{sc} \\ i_{sb} & i_{sc} \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} u_{sc} & u_{sa} \\ i_{sc} & i_{sa} \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} u_{sa} & u_{sb} \\ i_{sa} & i_{sb} \end{vmatrix}^2} \quad (2.63)$$

або

$$q = \vec{q}_S = |\vec{u}_S| \cdot |\vec{i}_S| \sin \varphi. \quad (2.64)$$

Використовуючи співвідношення (2.60), (2.12), (2.14), (2.16), можна розрахувати всі миттєві та інтегральні величини, що характеризують роботу системи електропостачання. Як буде показано нижче, значення модуля миттєвої реактивної потужності, розраховане за співвідношенням (2.63) або (2.64), дозволяє судити про оптимальність роботи системи з погляду мінімізації втрат енергії.

#### 2.4.2 Основні характеристики системи електропостачання

Роботу системи електропостачання характеризують такі величини:

1) кількість електроенергії, що передається від джерела до навантаження за умовний (довільний) інтервал часу:

$$E_{t_1-t_2} = \int_{t_1}^{t_2} p dt, \quad (2.65)$$

де  $p$  – миттєва активна потужність трифазного навантаження;

2) середня швидкість передачі енергії в умовному інтервалі часу, тобто середня активна потужність:

$$P_{t_1-t_2} = \frac{E_{t_1-t_2}}{t_2 - t_1}; \quad (2.66)$$

3) миттєва швидкість передачі електроенергії, що визначається за (2.16) або за показами лічильника електроенергії, тобто миттєва активна потужність

$$p_{t_1 \rightarrow t_2} = \frac{E_{t_1-t_2}}{t_2 - t_1}; \quad (2.67)$$

4) середнє значення втрат енергії в системі електропостачання за умовний інтервал часу  $\Delta E_{t_1-t_2}$ ;

5) середня швидкість втрат енергії в системі електропостачання за умовний період часу, тобто середня активна потужність втрат:

$$\Delta P_{t_1-t_2} = \frac{\Delta E_{t_1-t_2}}{t_2 - t_1}; \quad (2.68)$$

6) миттєва швидкість втрат, тобто миттєва активна потужність втрат:

$$\Delta p_{t_1 \rightarrow t_2} = \frac{\Delta E_{t_1-t_2}}{t_2 - t_1}; \quad (2.69)$$

7) коефіцієнт корисної дії СЕ в інтервалі часу  $[t_1, t_2]$ :

$$\eta_{t_1-t_2} = \frac{P_{t_1-t_2}}{P_{t_1-t_2} + \Delta P_{t_1-t_2}}; \quad (2.70)$$

8) миттєвий ККД в умовний момент часу:

$$\eta(t) = \frac{P}{p + \Delta p}. \quad (2.71)$$

Оскільки середня активна потужність однозначно визначається за відомим графіком миттєвої активної потужності

$$P_{t_1-t_2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p dt, \quad (2.72)$$

для розрахунку кількісних показників роботи системи електропостачання достатньо контролювати значення миттєвої активної потужності джерела (або навантаження) й миттєвої активної потужності втрат  $\Delta p$ .

Миттєву реактивну потужність необхідно віднести до якісних показників роботи СЕ. Дійсно, якщо паралельно до навантаження підімкнути безінерційний компенсатор, що забезпечує рівність нулю миттєвої реактивної потужності й відсутність пульсацій миттєвої активної потужності, то фазні струми джерела СЕ стають симетричними та синусоїдальними і співпадають за фазою з напругами джерела. Втрати енергії в системі в цьому разі визначаються, як сума втрат в лінії (в опорі  $R_{\Sigma}$  на рисунку 2.17) і втрат у компенсаторі, підімкненому паралельно до навантаження. Варто підкреслити, що підімкнення компенсатора реактивної потужності до СЕ має сенс з погляду енергозбереження тільки в тому разі, якщо сумарні втрати електроенергії (беручи до уваги внутрішні втрати в самому компенсаторі) зменшаться після підімкнення компенсатора. Щоб зменшити втрати електроенергії, потрібно зменшити діючі значення фазних струмів системи при незмінній середній потужності навантаження. Як показано в [48], такого ефекту досягають шляхом повної компенсації миттєвої реактивної потужності і пульсацій миттєвої активної потужності.

Зазначимо, що пульсації миттєвої активної потужності виникають унаслідок декількох причин [28; 14; 31; 113]: пульсації з частотою 100 Гц (із подвійною частотою мережі) і вище виникають через несинусоїдальність і пофазну асиметрію струмів навантаження; пульсації з частотою, значно меншою за частоту мережі, обумовлені повільним змінюванням струму навантаження, наприклад секундними, хвилинними, годинними й добовими змінами графіка навантажень в СЕ.

На рисунку 2.19 показано часову залежність модуля вектора струму, проекції якого на осі просторової прямокутної системи координат а, b, с (фазні струми) містять всі непарні гармоніки й асиметричні, тобто:

$$i_{La} + i_{Lb} + i_{Lc} \neq 0. \quad (2.73)$$

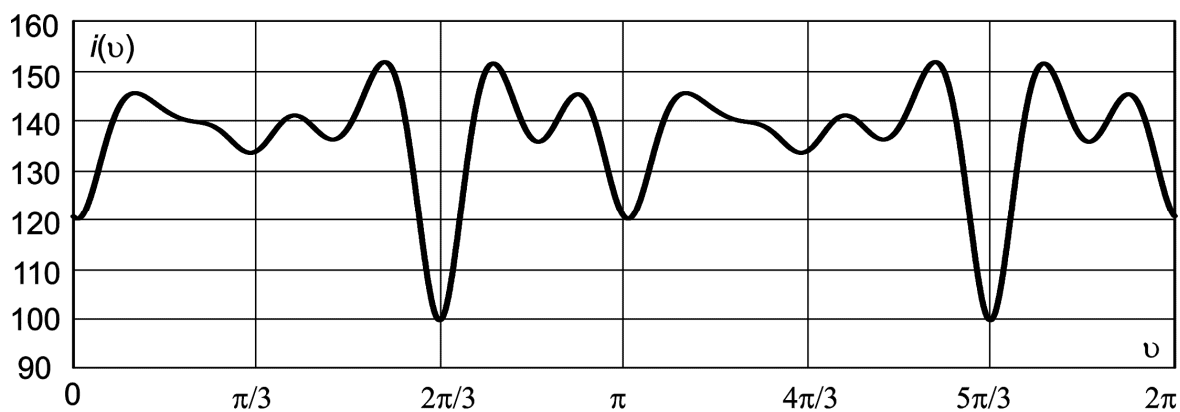


Рисунок 2.19 – Часова залежність модуля просторового вектора струму

Під час розрахування кривої, наведеної на рисунку 2.19, прийнято, що амплітуди основних гармонік струму  $I_{la\max} = 100$  А,  $I_{lb\max} = 130$  А,  $I_{lc\max} = 70$  А, а амплітуди вищих гармонік – обернено пропорційні їхньому порядку:

$$\begin{aligned} I_{na\max} &= \frac{I_{la\max}}{n}, \\ I_{nb\max} &= \frac{I_{lb\max}}{n}, \\ I_{nc\max} &= \frac{I_{lc\max}}{n}, \end{aligned} \quad (2.74)$$

де  $n = 3, 5, 7, 9, 11 \dots$  – порядок гармонік струму.

Розкладання в ряд Фур'є кривої, поданої на рисунку 2.19, доводить, що в ній містяться тільки парні гармоніки:  $n = 2, 4, 6, 8, 10 \dots$ . Оскільки в разі прийнятого раніше припущення про синусоїдальність і симетрію напруг мережі 6(10) кВ часова залежність модуля вектора напруги становить пряму лінію, паралельну осі часу, крива миттєвої активної потужності навантаження за формою повторює криву на рисунку 1.19, тобто містить тільки парні гармоніки.

Необхідно зазначити, що компенсувати миттєву реактивну потужність або змінну складову реактивної потужності неможливо без одночасної компенсації високочастотних складових миттєвої активної потужності. Дійсно повна компенсація миттєвої реактивної потужності співвідноситься із співпадінням у будь-який момент часу напрямів просторових векторів напруги й струму мережі. Таке співпадіння у всіх точках осі часу можливе, тоді коли форма фазних напруг співпадає з формою відповідних фазних струмів. Оскільки припускається симетричність і синусоїдальність напруг мережі, струми в СЕ після підімкнення паралельно до навантаження компенсатора також повинні бути симетричними й синусоїдальними, тобто пульсацій миттєвої активної потужності джерела не повинно бути. На підставі викладеного вище можна сформулювати фундаментальну вимогу щодо компенсатора: компенсатор, де використовується інформація, що міститься у векторах напруги мережі  $\vec{u}_s$  і струму навантаження  $\vec{i}_L$ , а також інформація про значення розрахункової корисної складової активної потужності, повинен забезпечити фактично безінерційну одночасну компенсацію миттєвої реактивної потужності й високочастотних (із частотою більшою за частоту мережі) пульсацій миттєвої активної потужності. Щоб компенсувати високочастотні пульсації миттєвої активної потужності, необхідно

встановити в компенсаторі накопичувач енергії відносно невеликої ємності.

Виконання сформульованої вище фундаментальної вимоги щодо компенсатора, що підмикається паралельно до навантаження, забезпечує в будь-який момент часу мінімум втрат в СЕ при заданому графіку миттєвої активної потужності в періоді повторюваності, що істотно перевищує період повторюваності напруги мережі – секунди, хвилини, години, доби.

Як доведено в [46; 48], компенсація низькочастотних пульсацій миттєвої активної потужності може впливати на підвищення ККД СЕ не менше ніж компенсація реактивної потужності. Функції компенсації низькочастотних пульсацій миттєвої активної потужності може виконувати той самий компенсатор, що використовується для компенсації реактивної потужності й високочастотних пульсацій миттєвої активної потужності, однак для цього потрібно мати накопичувач енергії значно більшої ємності [30].

#### 2.4.3 Коефіцієнт потужності і ККД системи електропостачання

Отже, якщо реактивна потужність джерела СЕ дорівнює нулю, фазні струми джерела синусоїдальні й за фазою співпадають з фазними напругами. У цьому режимі роботи в будь-який момент часу модуль вектора струму мінімальний при заданій миттєвій активній потужності.

Розглянемо, як впливає на ККД значення модуля вектора реактивної потужності у разі, якщо фазні струми навантаження синусоїдальні, але зсунуті відносно фазних напруг на кут  $\varphi$ .

У [48] доведено, що трифазна симетрична система електропостачання змінного струму в зазначеному вище випадку приводиться до системи електропостачання постійного струму (рис. 1.24). Відповідно до рисунка 1.24, значення напруги джерела дорівнює модулю просторового вектора напруги  $|\vec{u}_s|$ .

До еквівалентного джерела напруги  $u_s$  через опір лінії  $R_s$  підмикаються два еквівалентні джерела струму, струм одного з яких дорівнює модулю вектора активного струму  $|\vec{i}_L| \cos \varphi$ , а іншого – модулю вектора реактивного струму  $|\vec{i}_L| \sin \varphi$ . Оскільки вектори активного й реактивного струмів ортогональні, а падіння напруги на опорі  $R_s$  відносно невелике порівняно з напругою джерела  $u_s$ , напруга на навантаженні  $u_L$  у першому наближенні не залежить від значення реактивного струму.



З огляду на це миттєва активна потужність джерела –

$$p = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} U_m \cdot I_{Lact}(t), \quad (2.75)$$

а модуль миттєвої реактивної потужності –

$$q = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} U_m \cdot I_{Lract}(t). \quad (2.76)$$

Як базисну доцільно прийняти величину потужності резистивного КЗ (1.68).

Із (2.75), (2.76) і (1.68):

$$p_* = \frac{2 \cdot p \cdot R_s}{3 \cdot U_m^2} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{R_s}{U_m} I_{Lact}(t), \quad (2.77)$$

$$q_* = \frac{2 \cdot q \cdot R_s}{3 \cdot U_m^2} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{R_s}{U_m} I_{Lract}(t). \quad (2.78)$$

Якщо базисною величиною струму вважати струм резистивного КЗ (1.67), то з (2.77) і (2.78) отримаємо:

$$p_* = I_{Lact*}^2(t), \quad (2.79)$$

$$q_* = I_{Lract*}^2(t). \quad (2.80)$$

Миттєва активна потужність навантаження –

$$p_L = p - R_s \cdot I_{Lact}^2(t), \quad (2.81)$$

$$p_{L*} = p_* - \frac{2R_s^2}{3U_m^2} \cdot I_{Lact}^2(t) = p_* - p_*^2. \quad (2.82)$$

Зазначимо, що  $p_* \ll 1$ .

Миттєвий ККД СЕ –

$$\eta = \frac{p - R_s (I_{Lact}^2(t) + I_{Lract}^2(t))}{p}. \quad (2.83)$$

Із (2.83), (2.79) і (2.80):

$$\eta = 1 - p_* - \frac{q_*^2}{p_*}. \quad (2.84)$$

На рисунку 2.20 подано розраховані за (2.84) залежності миттєвого значення ККД від відношення миттєвої реактивної потужності до миттєвої активної потужності  $q_*/p_*$  і від відносного значення миттєвої активної потужності  $p_*$  як параметра. На рисунку 2.20 подано також залежність коефіцієнта потужності (пунктирна крива)  $\lambda$ , розраховану за співвідношенням

$$\lambda = \frac{p_*}{\sqrt{p_*^2 + q_*^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + q_*^2 / p_*^2}}. \quad (2.85)$$

Як зрозуміло з рисунка 2.20, у разі прийнятого діапазону змінювання величин зростання відносного значення реактивної потужності може призводити до зниження ККД від 1,5 % до 6,5 %.

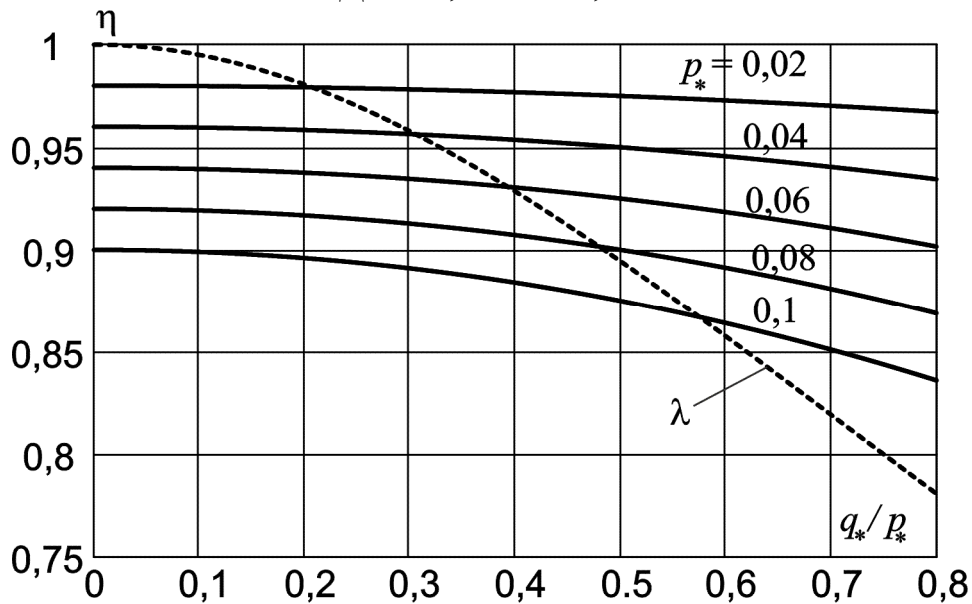


Рисунок 2.20 – Залежність миттєвого ККД і миттєвого коефіцієнта потужності від параметра  $q^*/p^*$

Варто зазначити, що відповідно до схеми рисунка 1.24 на максимум миттєвої активної потужності джерела накладається обмеження. Дійсно, за (2.82)

$$p_*^2 + p_{L*} - p_* = 0. \quad (2.86)$$

Звідси

$$p_* = \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - p_{L*}}, \quad (2.87)$$

$$p_{L*} < \frac{1}{4}, \quad (2.88)$$

$$p_* = \frac{p}{\frac{3U_m^2}{2R_S}} < \frac{1}{2}. \quad (2.89)$$

На рисунку 2.20 максимальне значення  $p^*$  приймається рівним 0,1.

## 2.5 Енергоефективність корекції фази струму з одночасною компенсацією пульсацій активної та реактивної потужностей у трифазних системах електропостачання

У разі, якщо напруги трифазної мережі симетричні й синусоїдальні, найбільший ККД системи електропостачання при заданій корисній

середній потужності за період повторюваності графіка миттєвої активної потужності співвідноситься з незмінним у часі резистивним навантаженням. Реальне навантаження, як правило, нелінійне, генерує в мережу вищі гармоніки струму, тоді як основна гармоніка струму не збігається за фазою з напругою джерела. Усі зазначені фактори спричиняють виникнення реактивної потужності [15]. Крім цього, унаслідок тимчасового змінювання особливостей технологічного процесу в навантаженні миттєва активна потужність може різнитися значною за значенням змінною складовою.

Застосування сучасних силових активних фільтрів, схеми яких наведено в [110; 122], дає змогу зменшити вплив вищих гармонік струму, скорегувати фазу струму мережі так, щоб напрями просторових векторів напруги джерела й струму навантаження збігалися. За допомогою такого самого активного фільтра й накопичувача енергії можна компенсувати й змінну складову графіка миттєвої активної потужності.

Необхідність придушення вищих гармонік, що генеруються навантаженням, пов'язана з вимогами стандартів щодо якості напруги мережі електропостачання і не обов'язково призводить до ефекту енергозбереження. Корекцію фази струму мережі й компенсацію пульсацій миттєвої активної та реактивної потужностей застосовують тільки в тому разі, коли вони забезпечують істотне зменшення потужності сумарних втрат у системі електропостачання. Це означає, що середня потужність втрат за період повторюваності у підімкненому до системи силовому активному фільтрі повинна бути меншою за середню потужність, на яку зменшуються втрати в джерелі й лінії електропередачі внаслідок підімкнення САФ:

$$\Delta P_S > \Delta P_{САФ}, \quad (2.90)$$

де  $\Delta P_S$  – середня за період повторюваності потужність, що співпадає з показником зменшення втрат у системі;  $\Delta P_{САФ}$  – середня за період повторюваності потужність втрат у САФ.

Якщо умова (2.90) виконується, витрати на установку та експлуатацію САФ окупиться внаслідок економії електроенергії, в іншому разі встановлювати САФ економічно не доцільно. Виконання умови (2.90) обумовлюється втратами в напівпровідникових ключах і ємнісному накопичувачі енергії САФ. Потужність втрат у напівпровідникових приладах не перевищує 1–2 % потужності установки, а втрати в ємнісному накопичувачі прямо пропорційні періоду повторюваності графіка пульсацій активної потужності. Розрахунки доводять, що в разі

компенсування добового графіка пульсацій активної потужності, наприклад за рахунок енергії, що накопичується в батареї суперконденсаторів з постійною часу розряду 100 год. [53], ККД САФ неприпустимо низький і співвідношення (2.90) не виконується. У разі компенсації хвилинних коливань енергія накопичувача на три порядки нижча й співвідношення (2.90) виконується із запасом.

У цьому підрозділі подано приклад розгляду залежності сумарного ККД системи електропостачання від форми графіків миттєвих активної і реактивної потужностей у разі одночасної повної компенсації постійної і змінної складових реактивної потужності та змінної складової активної потужності.

Розглянемо трифазну чотирипровідну симетричну систему напруг і струмів. Тривимірний просторовий вектор напруги й просторовий вектор струму визначаються співвідношеннями (2.12) і (2.14).

Модуль просторового вектора напруги вважатимемо постійним:

$$|\vec{u}_s| = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} U_m = \text{const}, \quad (2.91)$$

де  $U_m$  – амплітуда синусоїдальної фазної напруги джерела.

Вважатимемо, що модуль просторового вектора струму змінюється в часі:

$$|\vec{i}_s| = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_m(t) = f(t), \quad (2.92)$$

де  $I_m$  – амплітуда синусоїдального фазного струму джерела.

Відомо, що початок просторової декартової системи координат дотичний до деякої площини  $\alpha\beta$ , а три осі –  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , які виходять із початку координат, утворюють із площиною  $\alpha\beta$  однаковий кут  $\arctg(1/\sqrt{2})$ , [23; 28; 36; 110] тоді просторові вектори напруги й струму будуть рівномірно обертатися в площині  $\alpha\beta$  з частотою напруги джерела, утворюючи кут  $\varphi$ , що дорівнює куту зсуву між фазними напругами й струмами системи. Кут  $\varphi$  в загальному випадку є функцією часу. Можна розглядати спрощену задачу, коли кут  $\varphi$  є заданим і залишається постійним або повільно змінюється в часі:

$$\varphi = \text{const}. \quad (2.93)$$

У цьому разі миттєва активна потужність в системі електропостачання

$$p_s = |u_s| |i_s| \cos \varphi, \quad (2.94)$$

а миттєва реактивна потужність

$$q_s = |u_s| |i_s| \sin \varphi. \quad (2.95)$$

Із (2.91) – (2.95) випливає, що

$$p_S = \frac{3}{2} U_m I_m \cos \varphi, \quad (2.96)$$

$$q_S = \frac{3}{2} U_m I_m \sin \varphi. \quad (2.97)$$

У співвідношеннях (2.96), (2.97)  $U_m$  – константа, а амплітуда фазного струму  $I_m$  і кут  $\varphi$  – функції часу, що визначаються графіками активної та реактивної потужностей навантаження.

Еквівалентну схему системи електропостачання представлено на рисунку 1.24. Як зрозуміло з рисунку 1.24, трифазна симетрична система електропостачання змінного струму приводиться до системи електропостачання постійного струму, у якій напруга джерела  $u_S$  дорівнює модулю просторового вектора напруги за співвідношенням (2.12), активна складова струму навантаження  $i_{Lact}$  пропорційна миттєвому значенню активної потужності (2.96), а реактивна складова струму навантаження  $i_{Lreact}$  – пропорційна миттєвій реактивній потужності (2.97). Втрати в системі електропостачання пропорційні сумарному внутрішньому активному опору фази  $R_S$ .

Особливості еквівалентної схеми (рис. 1.24) обумовлюються ортогональністю активної і реактивної складових струмів джерела:

$$i_S = \sqrt{i_{Lact}^2 + i_{Lreact}^2}, \quad (2.98)$$

а також малим значенням падіння напруги на внутрішньому опорі джерела  $R_S$ , напруга на навантаженні  $u_L$  незначно залежить від величини реактивної складової струму  $i_{Lreact}$ .

Щоб спростити аналіз на першому етапі, вважатимемо, що величина  $u_L$  визначається активною складовою струму  $i_{Lact}$  і не залежить від значення реактивної складової  $i_{Lreact}$ , а реактивна потужність не залежить від падіння напруги на резисторі  $R_S$  під час протікання активного струму навантаження. Похибку, що вноситься зазначеними вище припущеннями, буде визначено в підрозділі 5.2 шляхом зіставлення результатів теоретичних розрахунків і результатів вимірювань на точній Matlab-моделі системи електропостачання змінного струму.

Вважатимемо, що графік миттєвої активної потужності визначається технологічним процесом і має вигляд (2.96).

Задамося двома можливими графіками миттєвої реактивної потужності:

$$q_{S1} = q_{L1} = vP_{usf} \left( 1 + \Delta \sin \frac{2\pi}{T} t \right), \quad (2.99)$$

$$q_{S2} = q_{L2} = vP_{usf} \left( 1 - \Delta \sin \frac{2\pi}{T} t \right), \quad (2.100)$$

де коефіцієнт  $v$  набуває таких значень:

$$0 \leq v \leq 1. \quad (2.101)$$

Графік реактивної потужності за (2.99) відповідає живленню навантаження від тиристорного некомпенсованого керованого випрямляча в разі незмінюваності кута управління й змінюваності струму. Графік реактивної потужності за (2.100) відповідає регулюванню керованого випрямляча з кутом управління  $\alpha$ .

Активну складову струму навантаження у відносних одиницях можна визначити за виразом (2.96), використавши рівняння балансу активних потужностей:

$$U_S i_{Lact} - R_S i_{Lact}^2 = P_{usf} \left( 1 + \Delta \sin \frac{2\pi}{T} t \right). \quad (2.102)$$

Із (2.102), застосувавши нескладні перетворення і ввівши базисну величину струму  $U_S/2R_S$ , отримаємо:

$$i_{Lact}^* = \frac{i_{Lact}}{U_S/2R_S} = 1 - \sqrt{1 - \frac{4}{k_{sc}} \left( 1 + \Delta \sin \frac{2\pi}{T} t \right)}. \quad (2.103)$$

Реактивні складові струмів навантаження у відносних одиницях, що відповідають (2.99), (2.100),

$$i_{Lreact1}^* = \frac{i_{Lreact1}}{U_S/2R_S} = \frac{2v}{k_{sc}} \left( 1 + \Delta \sin \frac{2\pi}{T} t \right), \quad (2.104)$$

$$i_{Lreact1}^* = \frac{i_{Lreact1}}{U_S/2R_S} = \frac{2v}{k_{sc}} \left( 1 - \Delta \sin \frac{2\pi}{T} t \right). \quad (2.105)$$

З огляду на ортогональність активного й реактивного струмів, визначимо квадрат сумарного миттєвого струму джерела у відносних одиницях:

$$i_{S*}^2 = i_{\Sigma*}^2 = i_{Lact*}^2 + i_{Lreact*}^2. \quad (2.106)$$

Квадрат діючого значення струму джерела в періоді повторюваності  $T$  у відносних одиницях

$$I_{S\partial*}^2 = I_{L\Sigma\partial*}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i_{S*}^2 dt. \quad (2.107)$$

Із (2.107), (2.99) – (2.106) випливає, що квадрат діючого значення струму, обчислений за період повторюваності, не залежить від форми графіка миттєвої реактивної потужності за (2.99), (2.100).

Номінальний ККД системи електропостачання, що відповідає її роботі за  $p = P_{usf} = \text{const}$ ,  $q = 0$ , визначається за теоремою про мінімально можливі втрати в трифазній системі електропостачання (2.34).

Загалом співвідношення для обчислення ККД виглядає так:

$$\eta = \frac{1}{1 + A}, \quad (2.108)$$

де  $A$  – коефіцієнт, пропорційний відносному значенню потужності втрат в опорі  $R_S$ .

За наявності пульсацій активної потужності ( $\Delta \neq 0$ )

$$\eta = \frac{1}{1 + A_{nom} \frac{I_{S^* \Delta}^2}{I_{S^* \Delta nom}^2}}, \quad (2.109)$$

де

$$A_{nom} = \frac{1}{\eta_{nom}} - 1. \quad (2.110)$$

У співвідношенні (2.109)  $I_{S^* \Delta nom}$  визначається при  $\Delta = 0$ ,  $v = 0$  з (2.103) – (2.106), а  $I_{S^* \Delta}$  – при заданих значеннях  $\Delta$  і  $v$  за тими самими формулами.

У таблицях 2.6–2.8 у колонках «розр.» наведено результати розрахунків ККД системи електропостачання за різних співвідношень параметрів, а на рисунку 2.21 наведено залежності ККД від параметрів  $\Delta$  і  $v$  за фіксованих значень  $k_{sc}$ . Права частина рисунка 2.21 ілюструє залежність ККД від відносної амплітуди пульсацій активної та реактивної потужностей у разі максимального значення середньої реактивної потужності. У лівій частині рисунка 2.21 наведено залежність ККД від відносного значення середньої реактивної потужності  $v$  у разі відсутності пульсацій миттєвої активної та реактивної потужностей ( $\Delta = 0$ ).

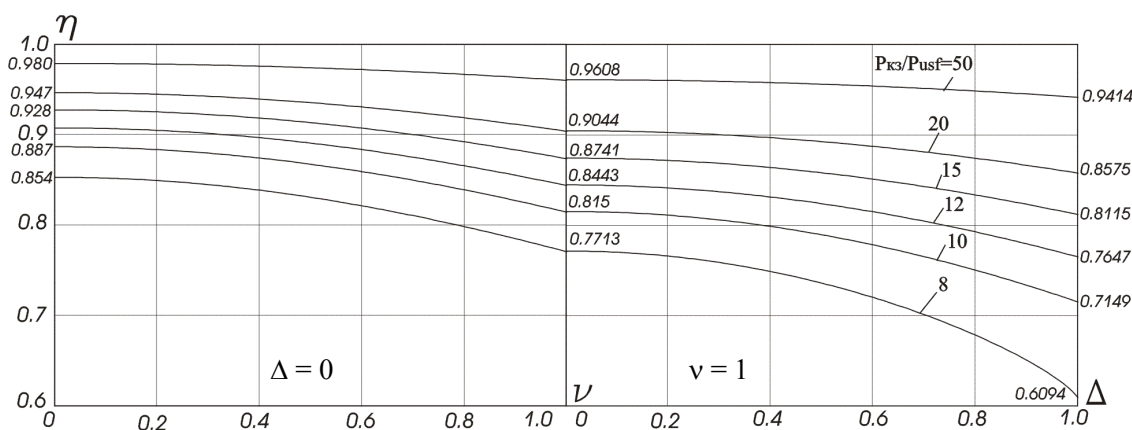


Рисунок 2.21 – Залежності ККД від параметрів  $\Delta$  і  $\nu$  при фіксованих значеннях  $k_{sc}$

Таблиця 2.6 – Результати розрахування ККД СЕ при  $\Delta = 0$ ,  $\nu = \text{var}$

$\nu$	$\eta$ (при $\Delta = 0$ , $\nu = \text{var}$ )											
	$k_{sc} = 10$			$k_{sc} = 15$			$k_{sc} = 20$			$k_{sc} = 50$		
	розр.	експ.	похиб. %	розр.	експ.	похиб. %	розр.	експ.	похиб. %	розр.	експ.	похиб. %
0	0,8873	0,8873	0,00	0,9282	0,9282	0,00	0,9472	0,9472	0,00	0,9796	0,9796	0,00
0,1	0,8865	0,8861	0,04	0,9276	0,9271	0,05	0,9468	0,9466	0,02	0,9794	0,9793	0,01
0,2	0,8842	0,8828	0,14	0,9259	0,9249	0,10	0,9454	0,9449	0,05	0,9788	0,9786	0,02
0,3	0,8803	0,8776	0,27	0,9230	0,9214	0,16	0,9432	0,9423	0,09	0,9779	0,9775	0,04
0,4	0,8749	0,8703	0,46	0,9191	0,9165	0,26	0,9401	0,9386	0,15	0,9765	0,9760	0,05
0,5	0,8680	0,8612	0,68	0,9140	0,9104	0,36	0,9361	0,9340	0,21	0,9748	0,9742	0,06
0,6	0,8598	0,8503	0,95	0,9079	0,9029	0,50	0,9313	0,9283	0,30	0,9727	0,9719	0,08
0,7	0,8503	0,8376	1,27	0,9009	0,8943	0,66	0,9257	0,9218	0,39	0,9703	0,9692	0,11
0,8	0,8396	0,8235	1,61	0,8928	0,8845	0,83	0,9193	0,9143	0,50	0,9675	0,9661	0,14
0,9	0,8278	0,8079	1,99	0,8839	0,8736	1,03	0,9122	0,9060	0,62	0,9643	0,9626	0,17
1	0,8150	0,7910	2,40	0,8741	0,8617	1,24	0,9044	0,8968	0,76	0,9608	0,9587	0,21

Таблиця 2.7 – Результати розрахування ККД СЕ при  $\Delta = 0$ ,  $\nu = \text{var}$

$\nu$	$\eta$ (при $\Delta = \text{var}$ , $\nu = 1$ )											
	$k_{sc} = 10$			$k_{sc} = 15$			$k_{sc} = 20$			$k_{sc} = 50$		
	розр.	експ.	похиб. %	розр.	експ.	похиб. %	розр.	експ.	похиб. %	розр.	експ.	похиб. %
0	0,8150	0,7910	2,40	0,8741	0,8617	1,24	0,9044	0,8968	0,76	0,9608	0,9587	0,21
0,1	0,8139	0,7895	2,44	0,8734	0,8609	1,25	0,9039	0,8962	0,77	0,9606	0,9584	0,22
0,2	0,8108	0,7850	2,58	0,8715	0,8584	1,31	0,9024	0,8945	0,79	0,9600	0,9578	0,22
0,3	0,8056	0,7775	2,81	0,8682	0,8543	1,39	0,9000	0,8916	0,84	0,9590	0,9567	0,23
0,4	0,7984	0,7670	3,14	0,8636	0,8485	1,51	0,8966	0,8875	0,91	0,9576	0,9552	0,24
0,5	0,7892	0,7536	3,56	0,8578	0,8411	1,67	0,8923	0,8824	0,99	0,9559	0,9533	0,26
0,6	0,7780	0,7371	4,09	0,8508	0,8322	1,86	0,8870	0,8761	1,09	0,9537	0,9510	0,27
0,7	0,7650	0,7217	4,33	0,8426	0,8218	2,08	0,8809	0,8688	1,21	0,9512	0,9482	0,30
0,8	0,7501	0,6943	5,58	0,8333	0,8100	2,33	0,8739	0,8604	1,35	0,9483	0,9451	0,32
0,9	0,7334	0,6672	6,62	0,8229	0,7968	2,61	0,8661	0,8510	1,51	0,9451	0,9415	0,36
1	0,7149	0,6344	8,05	0,8115	0,7822	2,93	0,8575	0,8409	1,66	0,9414	0,9376	0,38



З аналізу даних таблиць 2.6–2.8 і рисунка 2.21 випливає, що одночасна повна компенсація реактивної потужності й пульсацій активної потужності забезпечує істотне підвищення ККД системи електропостачання навіть при великих значеннях відношення  $P_{SC}/P_{usf}$ . Наприклад, при  $P_{SC}/P_{usf} = 50$  можливе підвищення ККД на 4 %, при  $P_{SC}/P_{usf} = 20$  – на 9 %. При  $P_{SC}/P_{usf} \leq 15$  можливе збільшення ККД перевищує 10 %.

Отримані теоретичні співвідношення для розрахунку ККД СЕ перевірено в підрозділі 6.6 за допомогою розробленої Matlab-моделі.

Таблиця 2.8 – Результати розрахування ККД СЕ при  $\Delta\eta = (\eta(k_{sc}, \Delta = 0, v = 0) - \eta(k_{sc}, \Delta = \text{var}, v = 1)) \cdot 100\%$

v	$\Delta\eta = (\eta(k_{sc}, \Delta = 0, v = 0) - \eta(k_{sc}, \Delta = \text{var}, v = 1)) \cdot 100\%$											
	$k_{sc} = 10$			$k_{sc} = 15$			$k_{sc} = 20$			$k_{sc} = 50$		
	розр.	експ.	похиб. %	розр.	експ.	похиб. %	розр.	експ.	похиб. %	розр.	експ.	похиб. %
0	7,23	9,63	-2,40	5,41	6,65	-1,24	4,28	5,04	-0,76	1,88	2,09	-0,21
0,1	7,34	9,78	-2,44	5,48	6,73	-1,25	4,33	5,10	-0,77	1,90	2,12	-0,22
0,2	7,65	10,23	-2,58	5,67	6,98	-1,31	4,48	5,27	-0,79	1,96	2,18	-0,22
0,3	8,17	10,98	-2,81	6,00	7,39	-1,39	4,72	5,56	-0,84	2,06	2,29	-0,23
0,4	8,89	12,03	-3,14	6,46	7,97	-1,51	5,06	5,97	-0,91	2,20	2,44	-0,24
0,5	9,81	13,37	-3,56	7,04	8,71	-1,67	5,49	6,48	-0,99	2,37	2,63	-0,26
0,6	10,93	15,02	-4,09	7,74	9,60	-1,86	6,02	7,11	-1,09	2,59	2,86	-0,27
0,7	12,23	16,56	-4,33	8,56	10,64	-2,08	6,63	7,84	-1,21	2,84	3,14	-0,30
0,8	13,72	19,30	-5,58	9,49	11,82	-2,33	7,33	8,68	-1,35	3,13	3,45	-0,32
0,9	15,39	22,01	-6,62	10,53	13,14	-2,61	8,11	9,62	-1,51	3,45	3,81	-0,36
1	17,24	25,29	-8,05	11,67	14,60	-2,93	8,97	10,63	-1,66	3,82	4,20	-0,38

## Висновки за розділом 2

1. У СЕ, які можуть бути приведені до еквівалентної схеми, яка складається з джерела, навантаження й резистивної лінії, що їх з'єднує, теоретичний максимальний ККД однозначно визначається за відношенням потужності резистивного КЗ джерела до корисної потужності, яка дорівнює середньому значенню активної потужності навантаження за період повторюваності. Умовами досягнення максимально можливого ККД є рівність нулю миттєвої реактивної потужності в будь-якій точці осі часу й відсутність пульсацій миттєвої активної потужності в будь-якому інтервалі часу.

2. Унаслідок порушення умов мінімуму потужності втрат реальний ККД може бути значно меншим максимально можливого. Підвищення ККД, тобто наближення його до максимально можливого значення, можна досягнути шляхом підімкнення паралельно до навантаження силового активного фільтра з накопичувачем енергії, що забезпечує симетрію й синусоїдальність струмів трифазного джерела і, одночасно, відсутність пульсацій миттєвої активної потужності джерела. Ефект підвищення ККД досягається, якщо втрати енергії в силовому активному фільтрі й накопичувачі енергії істотно менші, ніж величина різниці втрат енергії в джерелі й лінії після підімкнення і до підімкнення силового активного фільтра.

3. У системах електропостачання з двоспрямованим енергетичним потоком графік миттєвої активної потужності складається з періодів повторюваності, що відрізняються один від одного на декілька порядків: добу, годину, хвилину, секунду. Наявність пульсацій миттєвої активної потужності з різними періодами повторюваності призводить до додаткового зниження ККД системи електропостачання порівняно з випадком пульсації тільки однієї частоти. Пульсації миттєвої активної потужності в трифазних чотирипровідних СЕ охоплюють два діапазони частот: високочастотний – від 100 Гц і вище і низькочастотний – нижче 100 Гц. Причиною пульсацій миттєвої активної потужності у високочастотному діапазоні є несинусоїдальність струмів навантаження та їхня пофазна асиметрія. У низькочастотному діапазоні виникають пульсації миттєвої активної потужності з секундними, хвилинними, годинними, добовими періодами повторюваності, обумовленими характером навантаження.

4. При характерних для розподілених мереж електропостачання значеннях відношення потужності резистивного короткого замикання до номінальної корисної потужності навантаження ( $P_{SC}/P_{usf}$ ), що містяться в діапазоні 10–20, і резерви підвищення ККД у разі компенсації трьох пульсацій активної потужності становлять від 10 % до 4 %.

5. Повністю компенсувати змінну складову миттєвої реактивної потужності неможливо, не компенсувавши високочастотні пульсації миттєвої активної потужності. Отже, компенсатор повинен бути фактично безінерційним, а щоб він працював, завжди потрібен накопичувач енергії, що забезпечує компенсацію високочастотних пульсацій миттєвої активної потужності.

6. У СЕ у разі компенсації високочастотних пульсацій активної та модуля реактивної потужностей миттєвий ККД однозначно визначається відносними (в долях потужності резистивного КЗ системи) значеннями низькочастотних складових миттєвих активної та реактивної потужностей (див. співвідношення (2.84) і рис. 2.21). Ступінь зниження ККД у разі збільшення модуля реактивної потужності залежить від відносного значення активної потужності й може досягати 15 %.

7. Доведено збільшення ККД систем електропостачання шляхом компенсування змінної складової миттєвої активної потужності одночасно з компенсуванням миттєвої реактивної потужності. Якщо значення параметра відношення потужності резистивного короткого замикання системи до номінальної активної потужності навантаження лежать в межах  $10 < P_{SC}/P_{usf} < 20$ , властивих для розподілених мереж електропостачання з двоспрямованим енергетичним потоком, сумарний ККД системи електропостачання теоретично може бути підвищений на 10–15 %.

8. Запропоновано спрощений метод розрахування ККД системи електропостачання, що забезпечує прийнятну точність результатів при  $P_{SC}/P_{usf} > 12$ , а також точний метод розрахування ККД з використанням Matlab-моделі симетричної системи електропостачання з можливістю завдання довільних циклічних графіків миттєвих активної та реактивної потужностей.

9. Для ефективного компенсування реактивної потужності необхідно застосовувати силові активні фільтри, що компенсують як постійну, так і змінну складові реактивної потужності. Використання пасивних конденсаторних компенсаторів, налаштованих на середню реактивну потужність навантаження, за наявності пульсацій миттєвої реактивної потужності не забезпечує повного енергозберігаючого ефекту.

## **РОЗДІЛ 3 РОЗВИТОК СУЧАСНОЇ ТЕОРІЇ МИТТЄВИХ АКТИВНОЇ І РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТЕЙ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ СУМАРНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВТРАТ І ЇЇ СКЛАДОВИХ У ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Сучасна теорія миттєвих активної і реактивної потужностей виникла внаслідок необхідності створення нових ефективних енергозберігаючих способів управління напівпровідниковими перетворювачами, що працюють в трифазних СЕ. Протягом понад 30 років розвитку до теорії було включено багато різноманітних математичних методів створення практичних алгоритмів управління, пов'язаних із перетвореннями координатних систем. Ключовим фактором підходів, які об'єднала сучасна теорія потужностей, є подання миттєвих значень фазних напруг і струмів трифазної мережі як результуючих двомірних або просторових векторів в одній з відомих систем координат [16; 92 – 94; 112; 113; 118; 122; 123; 126]. Орієнтація зазначених векторів у координатній системі обумовлює ефективність тієї або іншої теорії потужності щодо розрахування і компенсації складових миттєвої потужності.

Протягом останніх років дослідники цікавилися можливістю встановлення зв'язків положень сучасної теорії миттєвих активної і реактивної потужності, що описують алгоритми управління напівпровідниковими перетворювачами, і показників енергоефективності, які можна досягнути в процесі впровадження цих алгоритмів [2; 23; 26; 27; 30; 31; 50; 69; 71; 74–76; 96].

У цьому розділі під час розгляду положень сучасної теорії миттєвих активної і реактивної потужностей вивчаються питання представлення сумарної потужності втрат як її окремих складових, кожна із яких фізично обумовлена особливостями електромагнітних процесів, що відбуваються в трифазній СЕ, тобто встановлено причинно-наслідний зв'язок між втратами електричної енергії в системі електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами і характером енергообміну між елементами системи, що може бути описаний за допомогою математичного апарату сучасної теорії потужності.

### **3.1 Енергія і потужність в системах розподіленого електропостачання**

На сьогодні можливості силової електроніки, швидкий розвиток якої в кінці п'ятдесятих років минулого століття обумовили розроблення й

промислове виробництво силових напівпровідникових приладів, використані майже повністю. Застосування сучасних напівпровідникових ключів привело до того, що розроблено і виготовлено перетворювачі електричної енергії з будь-якими необхідними характеристиками в діапазоні номінальних потужностей від декількох ват до сотень мегават [97; 101; 102; 109; 114; 124].

Численні наукові публікації щодо силової електроніки і систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами у виданнях України, Росії, США, Європейських країн, Японії зазвичай базуються на коректному використанні прийнятої міжнародними стандартами термінології і на адекватному уявленні про електромагнітні процеси в розглядуваних системах.

На жаль, у багатьох наукових роботах можна зустріти нечітко сформульовані визначення, неясні терміни і, що найгірше, використовуються застарілі або й зовсім помилкові твердження стосовно електромагнітних процесів у системах електропостачання. Непорозуміння виникають здебільшого, коли розглядаються процеси передавання і накопичення енергії або швидкість обміну енергією між окремими елементами системи електропостачання.

Однією з причин нечіткості уявлень про енергію і потужність, імовірно, є відсутність прогресу у викладі розділів «Активна, реактивна й повна потужність» і «Миттєва потужність і коливання енергії в колі синусоїдального струму» в підручниках з ТОЕ за період із 1952 року і по сьогодні [12; 62; 63; 64]. У підручниках останніх років [12; 62], по суті, повторюються твердження шістдесятирічної давнини [64]. Подібні погляди суперечать сучасним уявленням про електромагнітні процеси, які відбуваються в системах розподіленого електропостачання з накопичувачами енергії, напівпровідниковими перетворювачами та двоспрямованим енергетичним потоком в елементах системи.

У цьому підрозділі викладено положення теорії передачі енергії і теорії потужності в системах електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами й накопичувачами енергії [13; 14; 16; 23; 25–28; 30–32; 35; 35; 38; 41; 42; 46; 48], що за своєю структурною топологією і призначенням відповідають концепції Smart Grid. На відміну від [12; 62], як основний варіант розглядаються не однофазні, а трифазні трипровідні або чотирипровідні системи електропостачання з симетричним трифазним джерелом синусоїдальних напруг. Однофазні системи електропостачання

при такому підході є різновидом асиметричної трифазної системи з нескінченно великими опорами в двох з трьох фаз навантаження.

Положення підрозділу співвідносяться з положеннями сучасних теорій потужності, викладеними у монографії [93] і в численних журнальних публікаціях, наприклад [91–95; 103; 110, 111–113, 116; 118; 119; 122; 123].

### 3.1.1 Базові характеристики систем електропостачання

Трифазні СЕ з джерелами синусоїдальних симетричних напруг включають сім базових елементів: генератори електричної енергії, трансформатори й реактори, напівпровідникові перетворювачі, фільтрокомпенсуючі пристрої, накопичувачі енергії, пасивні та активні навантаження, сполучні кабелі.

Схеми з'єднання елементів СЕ можуть бути різноманітними й складними, проте, під час розгляду процесів обміну енергією їх, зазвичай, можна привести до простої еквівалентної трипровідної схеми, зображеної на рисунку 3.1, або до чотирипровідної схеми (рис. 3.2).

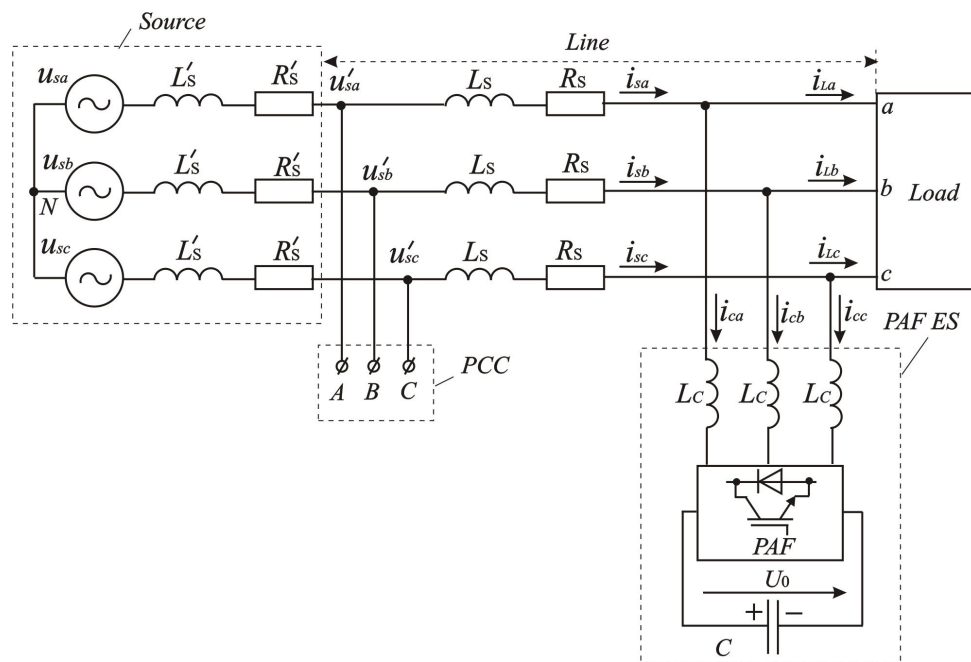


Рисунок 3.1 – Еквівалентна схема трифазної трипровідної СЕ

*Source* – джерело трифазної синусоїдальної симетричної напруги;  
*Load* – навантаження; *Line* – лінія, що з'єднує джерело з навантаженням;  
*PAF ES* – силовий активний фільтр, з'єднаний з накопичувачем енергії;  
*PCC* – загальні точки підімкнення навантажень

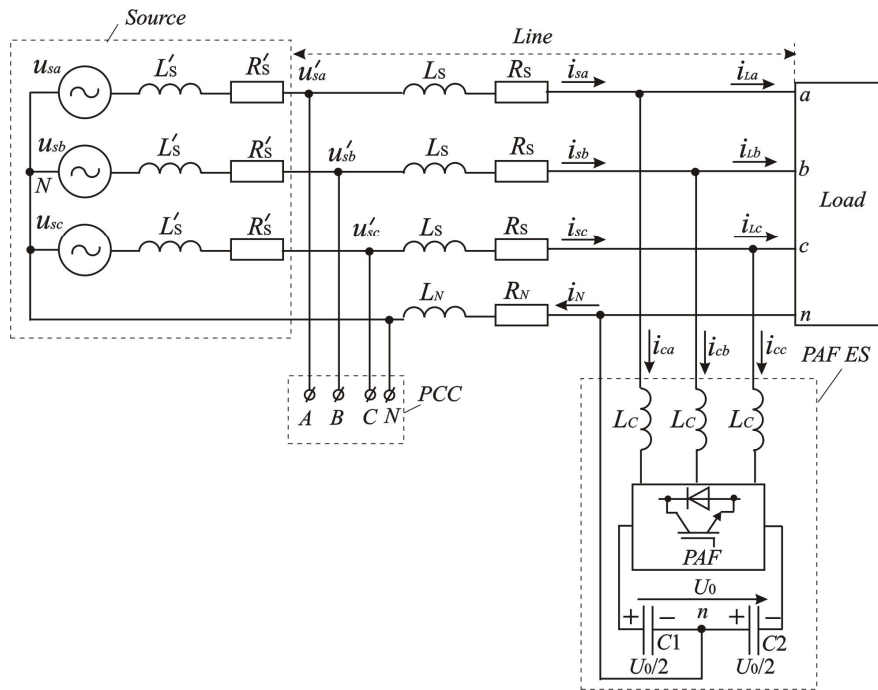


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема трифазної чотирипровідної СЕ

Схеми СЕ призначені для передачі електричної енергії з джерела в навантаження або з навантаження в джерело. У середині блока навантаження може відбуватися як перетворення електричної енергії в теплову, хімічну, механічну, світлову та інші різновиди, так і зворотне перетворення енергії.

Основними характеристиками СЕ є:

- кількість електричної енергії  $E$ , що передається за деякий інтервал часу, наприклад за період повторюваності, у джоулях (Дж);
- миттєва й середня швидкості передачі енергії за певний інтервал часу у ватах (Вт), які будемо називати миттєвою  $p$  або середньою  $P$  активною потужністю відповідно;
- втрати енергії в СЕ ( $\Delta E$ ) за розглядуваний інтервал часу;
- коефіцієнт корисної дії при передачі енергії  $\eta$  за будь-який за тривалістю розглядуваний інтервал часу.

Зазначені вище характеристики СЕ, які можна вважати кількісними, поєднані такими співвідношеннями:

- енергія, що передається

$$E = \int_t^{t+T} p dt = P \cdot T, \quad (3.1)$$

де  $T$  – період повторюваності;  $p$  – миттєва активна потужність;

– середня активна потужність

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p dt; \quad (3.2)$$

– ККД

$$\eta = \frac{E}{E + \Delta E} \quad (3.3)$$

або

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P}, \quad (3.4)$$

де  $\Delta E$  – втрати енергії;  $\Delta P$  – середня за аналізований інтервал часу потужність втрат енергії.

Зазначимо, що знак активної, миттєвої або усередненої потужностей визначає напрям потоку енергії: у разі позитивної активної потужності енергія передається з джерела в навантаження, у разі негативної активної потужності напрямок потоку енергії зворотний.

Під час аналізу енергетичної ефективності СЕ, чисельною оцінкою якої є ККД, необхідно визначити умови, у разі виконання яких досягається максимальний теоретично можливий ККД, а також реальний ККД, що відповідає певному режиму роботи СЕ. Для визначення цих умов використовують поняття, прийняті у співвідношеннях (3.1) – (3.4), а також параметри схеми електропостачання й графіка миттєвої активної потужності.

Базовими якісним показником СЕ є коефіцієнт нелінійних спотворень напруг (THD) на клеммах в точці загального з'єднання, РСС, (див. рис. 3.1 і 3.2), значення якого регламентується стандартами [7–11; 108] і визначається зі співвідношенням

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1} = \frac{\sqrt{U_{\delta}^2 - U_1^2}}{U_1}, \quad (3.5)$$

де  $k = 1, 2, 3, \dots, \infty$  – порядок гармоніки напруги;  $U_k$  – діюче значення напруги гармоніки з номером  $k$ ;  $U_1$  – діюче значення основної гармоніки напруги;  $U_{\delta}$  – діюче значення напруги з урахуванням всіх гармонік.

Іншим якісним показником може бути значення модуля вектора миттєвої реактивної потужності, що в трифазній системі електропостачання дорівнює векторному добутку просторового вектора напруги й просторового вектора струму. Рівність модуля вектора миттєвої реактивної потужності нулю є однією з двох умов досягнення максимального ККД у СЕ.

Виокремимо кілька особливостей еквівалентних схем.



Навантаження не вирізняються будь-якими обмеженнями: всередині триполюсника (рис. 3.1) або чотириполюсника (рис. 3.2) можуть міститися резистори, конденсатори, реактори, нелінійні елементи, джерела напруги й струму. Період повторюваності графіка миттєвої активної потужності трифазного навантаження не збігається з періодом повторюваності напруги джерела. Зазвичай період повторюваності графіка миттєвої активної потужності значно (на декілька порядків) більший за період повторюваності напруги джерела:

$$T \gg T_S, \quad (3.6)$$

де  $T_S$  – період повторюваності синусоїдальних напруг джерела.

На рисунку 3.1 і 3.2 індуктивність  $L'_S$  і опір  $R'_S$  обумовлюються еквівалентними параметрами генератора й трансформатора джерела. Індуктивність  $L_S$  і опір  $R_S$  визначаються параметрами кабелів, реакторів і трансформаторів, через які передається електрична енергія. Здебільшого витримуються нерівності

$$L_S \gg L'_S, \quad (3.7)$$

$$R_S \gg R'_S. \quad (3.8)$$

На вході блока *PAF ES*, що відіграє роль силового активного фільтра й керованого накопичувача енергії, виключаються три реактора з індуктивністю  $L_C$ , значення якої зазвичай значно більше за індуктивність  $L_S$ :

$$L_C \gg L_S. \quad (3.9)$$

### 3.1.2 Потужність резистивного короткого замикання

Під час аналізу втрат енергії і ККД СЕ доцільно використовувати величину розрахункової потужності резистивного короткого замикання  $P_{SC}$ . Потужність резистивного КЗ у разі спрямування потоку енергії від джерела до навантаження ( $P_{SC+}$ ) визначається відповідно до рисунка 3.3, а при зворотному напрямі потоку енергії ( $P_{SC-}$ ) – відповідно до рисунка 3.4.

Як було зазначено вище, падіння напруги на омичних опорах і індуктивностях лінії значно менші за напруги джерела й навантаження, тому здебільшого припускають, що

$$P_{SC+} = P_{SC-} = P_{SC}. \quad (3.10)$$

Потужність резистивного КЗ ( $P_{SC}$ ) визначають за співвідношенням [25]:

$$P_{SC} = \frac{3 \cdot U_{sm}^2}{2 \cdot (R_S + R'_S)}, \quad (3.11)$$

де  $U_{sm}$  – амплітуда фазної синусоїдальної напруги;  $R_S$  – омичний опір лінії;  $R'_S$  – внутрішній омичний опір джерела або навантаження.

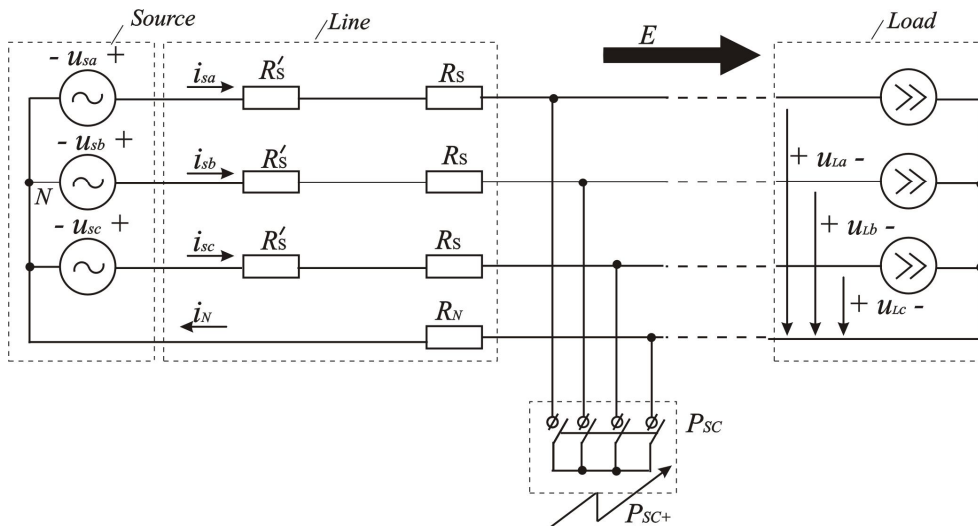


Рисунок 3.3 – Визначення потужності резистивного КЗ у разі спрямування потоку енергії від джерела до навантаження

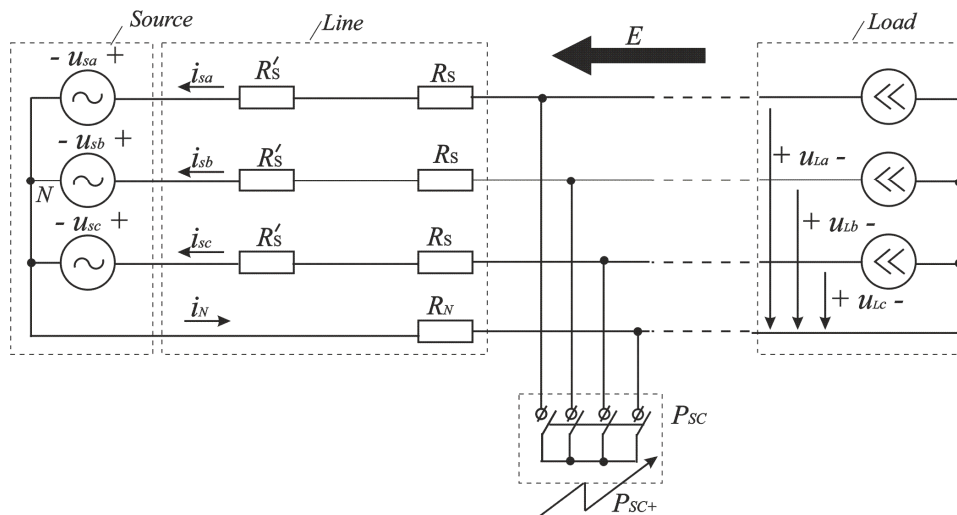


Рисунок 3.4 – Визначення потужності резистивного КЗ у разі спрямування потоку енергії від навантаження до джерела

Моделювання навантаження джерелами струму на рисунках 3.3 й 3.4 виправдано тим, що під час розрахування ККД системи електропостачання застосовують часові графіки модуля вектора струму або миттєвої активної потужності та визначають їхній період повторюваності [25]. Реалізують ці графіки за допомогою замкненої системи автоматичного регулювання.

### 3.1.3 Розрахування коефіцієнта корисної дії системи електропостачання

Можна використовувати три режими роботи СЕ:

- режим 1 з односпрямованим потоком енергії – від джерела до навантаження протягом усього періоду повторюваності при  $p_s > 0, p_L > 0$ ;
- режим 2 з односпрямованим потоком енергії – від навантаження до джерела при  $p_s < 0, p_L < 0$ ;
- режим 3 з двоспрямованим потоком енергії, якщо в періоді повторюваності інтервали часу з позитивними миттєвими активними потужностями  $p_s > 0, p_L > 0$  чергуються з інтервалами часу з негативними миттєвими активними потужностями  $p_s < 0, p_L < 0$ .

Вважатимемо, що у всіх трьох зазначених режимах щодо миттєвої активної потужності втрат і миттєвої активної потужності передавання енергії дотримуються таких співвідношень:

$$\begin{aligned}\Delta p &<< |p_s|, \\ \Delta p &<< |p_L|.\end{aligned}\tag{3.12}$$

Миттєві та середні значення ККД за період повторюваності визначаються залежно від різновиду режиму за такими співвідношеннями:

- у режимі 1:

$$\eta_{1inst} = \frac{P_{L1}}{P_{S1}},\tag{3.13}$$

$$P_{S1} = P_{L1} + \Delta p_1,\tag{3.14}$$

$$\eta_1 = \frac{\int_t^{t+T} p_{L1} dt}{\int_t^{t+T} p_{S1} dt} = \frac{T \cdot P_{L1}}{T \cdot P_{S1}} = \frac{E_{L1}}{E_{S1}} = \frac{P_{L1}}{P_{S1}},\tag{3.15}$$

де  $T$  – період повторюваності графіка миттєвої активної потужності;  $\eta_{1inst}$  і  $\eta_1$  – миттєвий і середній ККД у режимі 1 відповідно;  $P_{L1}$  і  $P_{S1}$  – середні потужності навантаження й джерела за період повторюваності відповідно;

- у режимі 2:

$$\eta_{2inst} = \frac{P_{S2}}{P_{L2}},\tag{3.16}$$

$$-P_{L2} = -P_{S2} + \Delta p_2,\tag{3.17}$$

$$\eta_2 = \frac{\int_t^{t+T} p_{S2} dt}{\int_t^{t+T} p_{L2} dt} = \frac{T \cdot P_{S2}}{T \cdot P_{L2}} = \frac{E_{S2}}{E_{L2}} = \frac{P_{S2}}{P_{L2}}.\tag{3.18}$$

У режимі 3 ККД визначається шляхом розбиття графіка миттєвої активної потужності на ділянки, у яких  $p_s > 0$ ,  $p_L > 0$ , і ділянки, у яких  $p_s < 0$ ,  $p_L < 0$ . Два значення ККД визначаються за співвідношеннями (3.15) і (3.18), а сумарний ККД зі співвідношенням

$$\eta_{\Sigma 3} = \frac{E_{L31} + E_{L32}}{E_{S31} + E_{S32}}, \quad (3.19)$$

де

$$\begin{aligned} E_{S31} &> 0, \\ E_{L31} &> 0, \\ E_{S32} &< 0, \\ E_{L32} &< 0. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Таким чином робота, СЕ в режимі 3 характеризується трьома значеннями ККД:

– ККД передавання енергії від джерела до навантаження:

$$\eta_{31} = \frac{E_{L31}}{E_{S31}}; \quad (3.21)$$

– ККД передавання енергії від навантаження до джерела:

$$\eta_{32} = \frac{E_{S32}}{E_{L32}}, \quad (3.22)$$

і сумарним ККД, що обчислюють за (3.19).

Щоб визначити залежність між трьома значеннями ККД у режимі 3 введемо коефіцієнт повернення енергії до джерела:

$$0 \leq k_E = \frac{-E_{S32}}{E_{S31}} \leq 1, \quad (3.23)$$

де

$$\begin{aligned} E_{S32} &< 0, \\ E_{S31} &> 0. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Підставивши в (3.19) співвідношення (3.21), (3.22), (3.23), після перетворення отримаємо:

$$\eta_{\Sigma 3} = \frac{\eta_{31} - \frac{k_E}{\eta_{32}}}{1 - k_E}. \quad (3.25)$$

У таблиці 3.1 наведено значення сумарного ККД в режимі 3, розраховані для заданих значень  $\eta_{31}$ ,  $\eta_{32}$  залежно від коефіцієнта повернення енергії  $k_E$ , якщо припустити, що

$$\eta_{31} = \eta_{32}. \quad (3.26)$$

За даними таблиці 3.1 побудовано залежності сумарного коефіцієнта корисної дії від коефіцієнта повернення енергії, подані на рисунку 3.5. За рисунком 3.5 зрозуміло, що навіть при невеликих втратах енергії в кабелях і джерелі в разі збільшення коефіцієнта повернення енергії сумарний ККД різко зменшується і при деяких комбінаціях параметрів дорівнює в нулю.

Таблиця 3.1 – Сумарний ККД СЕ в режимі 3

$k_E$	$\eta_{31} = \eta_{32}$								
	0,980	0,960	0,940	0,920	0,900	0,880	0,860	0,840	0,820
0	0,980	0,960	0,940	0,920	0,900	0,880	0,860	0,840	0,820
0,1	0,976	0,951	0,926	0,901	0,877	0,852	0,826	0,801	0,776
0,2	0,970	0,940	0,909	0,878	0,847	0,816	0,784	0,752	0,720
0,3	0,963	0,925	0,887	0,848	0,810	0,770	0,730	0,690	0,649
0,4	0,953	0,906	0,857	0,809	0,759	0,709	0,658	0,606	0,554
0,5	0,940	0,878	0,816	0,753	0,689	0,624	0,557	0,490	0,420
0,6	0,919	0,837	0,754	0,670	0,583	0,459	0,406	0,314	0,221
0,7	0,886	0,769	0,651	0,530	0,407	0,282	0,153	0,022	—
0,8	0,818	0,633	0,445	0,252	0,056	—	—	—	—
0,9	0,616	0,225	0,174	—	—	—	—	—	—

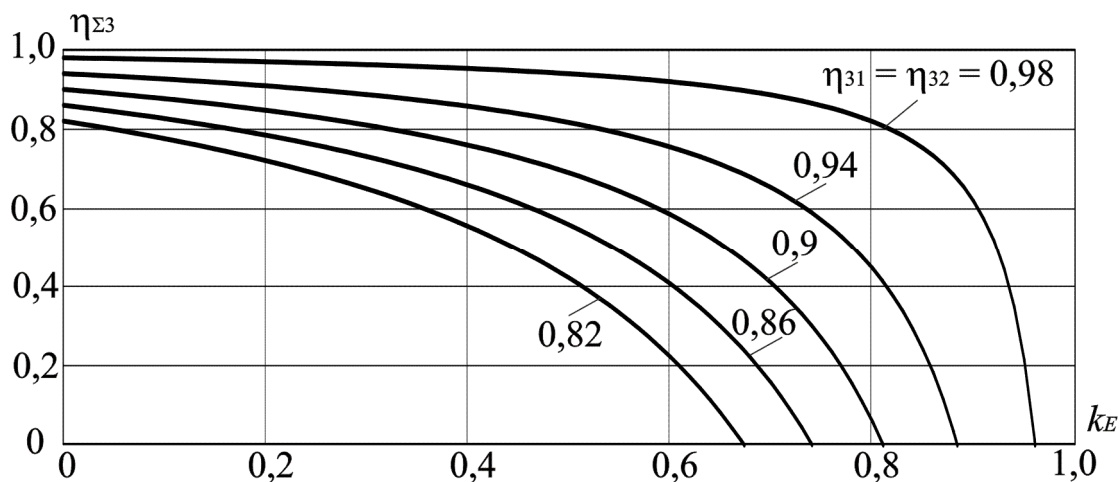


Рисунок 3.5 – Сумарний ККД СЕ в режимі 3

Прийнявши, що в співвідношенні (3.25)  $\eta_{\Sigma 3} = 0$ , визначимо залежність значень односпрямованих ККД, які відповідають нульовому сумарному ККД, від коефіцієнта повернення енергії:

$$\eta_{31} = \eta_{32} = \sqrt{k_E} . \quad (3.27)$$

Побудовану за співвідношенням (3.27) залежність наведено на рисунку 3.6.

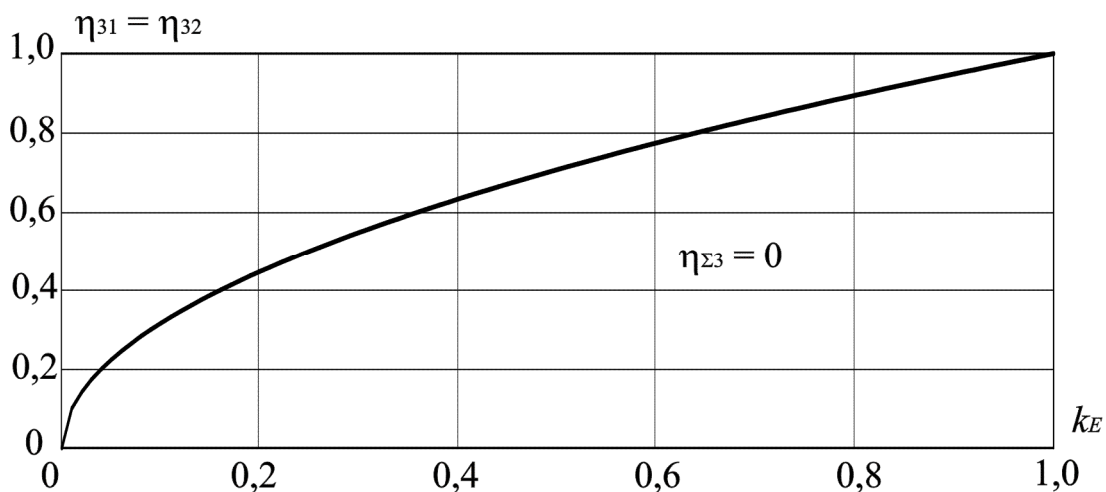


Рисунок 3.6 – Залежність значень односпрямованих ККД СЕ від коефіцієнта повернення енергії, що відповідають  $\eta_{\Sigma 3} = 0$

Зазначимо, що напрям потоку енергії в СЕ може обумовлюватися двома факторами: технологією роботи навантаження, наприклад необхідністю рекуперативного гальмування в системі електроприводу, і взаємним обміном енергією між реактивними елементами в різних фазах навантаження без обміну з мережею живлення трифазної синусоїдальної напруги. У першому випадку період повторюваності процесу обміну енергією зазвичай значно більший за період напруги джерела, а в другому – реактивні елементи обмінюються енергією з частотою мережі. Обидва чинники призводять до зниження сумарного коефіцієнта корисної дії.

#### 3.1.4 Максимальний і реальний коефіцієнти корисної дії

У розділі 2, а також у [25–27] доведено, що максимального значення ККД досягають у трифазній симетричній СЕ з резистивним симетричним навантаженням за відсутності пульсацій миттєвої активної потужності. Чисельне значення максимального ККД однозначно залежить від параметра відношення потужності резистивного короткого замикання й корисної потужності,  $P_{SC}/P_{usf}$ .

Реальний середній ККД, обчислений в періоді повторюваності, завжди менший ніж максимальний ККД, оскільки спостерігаються пульсації миттєвої активної потужності трифазної системи, а також фактори, що обумовлюють фазовий зсув сумарного вектора струму відносно сумарного вектора напруги мережі живлення, а саме:

- реактивний або змішаний характер навантаження;
- несиметрія резистивного або змішаного навантаження;
- нелінійність навантаження;

- несинусоїдальність напруги мережі живлення;
- несиметрія напруги мережі живлення.

Зазначені фактори можуть виявлятися одночасно в і по-різному поєднуватися. Для трифазної чотирипровідної СЕ (у разі односпрямованого енергетичного потоку з джерела до навантаження) можливі 32 поєднання чинників [41], які наведені в таблиці 3.2, і тільки одне з них – симетрична синусоїдальна напруга й лінійне резистивне симетричне навантаження (комірка 1.1 в табл. 3.2) – забезпечує максимально можливий ККД СЕ. Усі інші поєднання відповідають більшому рівню втрат енергії за тієї самої середньої активної потужності СЕ, тобто реальному ККД.

Реальний ККД СЕ можна наблизити до максимально можливого ККД шляхом підімкнення паралельно до навантаження силового активного фільтра з накопичувачем енергії (PAF ES). Параметри схеми й алгоритм роботи PAF ES у разі синусоїдальності й симетрії напруг мережі повинні забезпечувати синусоїдальну форму струмів мережі  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$  і їхній збіг за фазою з відповідними напругами. Зрозуміло, що втрати енергії в самому PAF ES повинні бути значно меншими, ніж значення, на яке зменшуються втрати в СЕ після підімкнення PAF ES. Приклади розрахування максимального й реального ККД трифазної чотирьохпровідної СЕ в разі асиметрії й нелінійності навантаження наведено в [27], де показано, що зменшення реального ККД порівнянно з максимальним може перевищувати 10 %.

### 3.1.5 Обмін енергією, миттєві активна й реактивна потужності

Як показано вище, двоспрямований обмін енергією між джерелом і навантаженням призводить до значного зменшення ККД СЕ (див. рис. 3.5). До тих самих наслідків призводить і обмін енергією за участю інших елементів СЕ, наприклад, батарей конденсаторів або батарей реакторів.

Потрібно зазначити, що в трифазній системі електропостачання адекватну картину електромагнітних процесів можна отримати, беручи до уваги всі три фазні струми і всі три фазні напруги одночасно.

Як приклад, розглянемо трифазні симетричні мережі з лінійним навантаженням [28], подані на рисунку 3.7.

Трифазне навантаження й трифазне джерело вважатимемо єдиним пристроєм.

Відповідно до [16; 28; 31] визначимо просторові вектори напруги й струму в тривимірній декартовій системі координат, як у (2.12), (2.14).

Таблиця 3.2 – Поєднання параметрів напруги мережі й навантаження, від яких залежить ККД трифазної чотирипровідної СЕ

Напруга мережі		Навантаження							
		Симетричне				Несиметричне			
		Лінійне			Нелінійна	Лінійне			Нелінійне
		Резистивне	Реактивне	Змішане		Резистивне	Реактивне	Змішане	
Синусоїдальна	Симетрична	$p = P = const$ $I_q = 0, I_r = 0$ $\eta = \eta_{\max}$	$p = 0$ $I_q \neq 0, I_r = 0$ $\eta = 0$	$p = P = const$ $I_q \neq 0, I_r = 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q = 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$
	Несиметрична	$p = P + p_{\sim}$ $I_q = 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q = 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$
Несинусоїдальна	Симетрична	$p = P + p_{\sim}$ $I_q = 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$
	Несиметрична	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r = 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r = 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$

$p$  – миттєва активна потужність;

$P$  – середня активна потужність за період повторюваності;

$p_{\sim}$  – змінна складова миттєвої активної потужності;

$I_q$  – модуль проекції просторового вектора струму на вісь  $q$  просторової декартової системи  $pqr$ ;

$I_r$  – модуль проекції просторового вектора струму на вісь  $r$  просторової декартової системи  $pqr$ .



Миттєві значення фазних напруг і струмів відповідають проекціям узагальнених векторів напруги  $\vec{u}_s$  і струму  $\vec{i}_s$  на осі  $a, b, c$  нерухомої декартової системи координат:

$$\begin{aligned} u_{sa} &= U_m \cdot \sin \vartheta, \\ u_{sb} &= U_m \cdot \sin \left( \vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right), \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} u_{sc} &= U_m \cdot \sin \left( \vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} \right); \\ i_{sa} &= I_m \cdot \sin(\varphi - \varphi), \\ i_{sb} &= I_m \cdot \sin \left( \vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} - \varphi \right), \\ i_{sc} &= I_m \cdot \sin \left( \vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} - \varphi \right), \end{aligned} \quad (3.29)$$

де  $U_m, I_m$  – амплітуди фазних напруг і фазних струмів відповідно;  $\varphi$  – кут зсуву між фазними напругою і струмом, що чисельно дорівнює куту між просторовими векторами  $\vec{u}_s$  і  $\vec{i}_s$ ;

$$\vartheta = 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t, \quad (3.30)$$

де  $f$  – частота мережі;  $t$  – час.

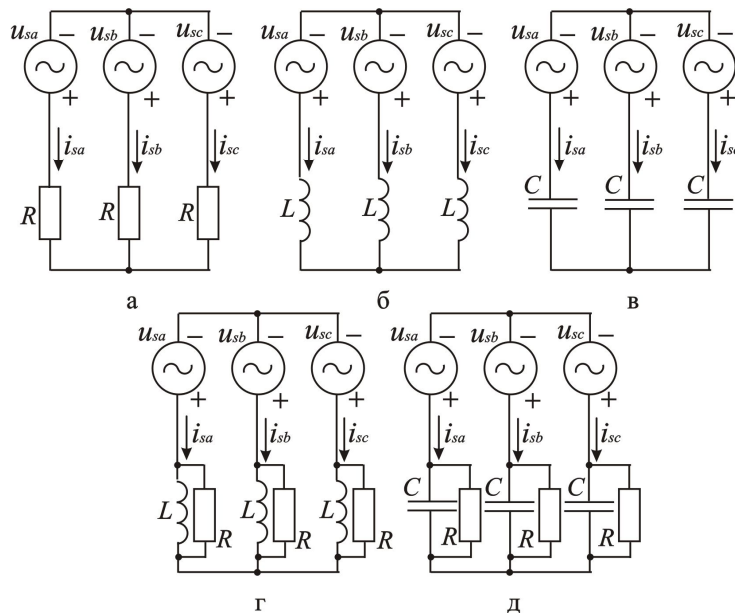


Рисунок 3.7 – Трифазні симетричні системи з лінійним навантаженням

Миттєва активна потужність джерела трифазної системи визначається, як скалярний добуток просторових векторів [16; 28; 31]:

$$p = \vec{u}_s \cdot \vec{i}_s = |\vec{u}_s| \cdot |\vec{i}_s| \cdot \cos \varphi = u_{sa} \cdot i_{sa} + u_{sb} \cdot i_{sb} + u_{sc} \cdot i_{sc}. \quad (3.31)$$

Якщо трифазна система електропостачання симетрична, то миттєва активна потужність в будь-який момент часу дорівнює середній активній потужності:

$$p = P = \frac{3}{2} \cdot U_m \cdot I_m \cdot \cos \varphi = \text{const.} \quad (3.32)$$

Миттєва реактивна потужність є розрахунковою векторною величиною і визначається, як векторний добуток просторових векторів напруги та струму, що обчислюють за співвідношенням (2.15) [16; 28; 31; 92; 93].

Модуль вектора миттєвої реактивної потужності симетричної системи

$$q = |\vec{q}| = \frac{3}{2} \cdot U_m \cdot I_m \cdot |\sin \varphi| = \sqrt{q_a^2 + q_b^2 + q_c^2} = \text{const.} \quad (3.33)$$

У трифазній СЕ з резистивним навантаженням (див. рис. 3.7, а) енергія передається від джерела до навантаження з постійною швидкістю, пульсацій миттєвої активної потужності не спостерігається, модуль вектора миттєвої реактивної потужності дорівнює нулю.

У разі реактивного навантаження (див. рис. 3.7, б, в) миттєва активна потужність джерела дорівнює нулю, що впливає зі співвідношень (3.31), (3.32). Непрямо підтверджує це незмінне в часі сумарне значення енергії, накопиченої в трифазному реакторі (рис. 3.7, б):

$$E_{L\Sigma} = \frac{L}{2} \cdot (i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2) = \frac{3}{4} \cdot L \cdot I_m^2 = \text{const} \quad (3.34)$$

і незмінність сумарної енергії, накопиченої в трифазній батареї конденсаторів (рис. 3.7, в)

$$E_{C\Sigma} = \frac{C}{2} \cdot (u_{sa}^2 + u_{sb}^2 + u_{sc}^2) = \frac{3}{4} \cdot C \cdot U_m^2 = \text{const.} \quad (3.35)$$

Якщо навантаження змішане (див. рис. 3.7, г, д) схему СЕ можна розділити на дві паралельно працюючі СЕ, у одній з яких наявне активне навантаження, а в іншій – реактивне, тобто випадок із активно-реактивним навантаженням зводиться до розглянутих раніше.

Зазначимо дві принципові відмінності між трифазною і однофазною СЕ:

– при чисто активному симетричному навантаженні швидкість передачі енергії (миттєва активна потужність) трифазної СЕ постійна. В однофазній СЕ швидкість передачі енергії змінюється з подвійною частотою мережі, до того ж амплітуда змінної складової активної потужності дорівнює подвоєному значенню середньої активної потужності;

– при чисто реактивному навантаженні в трифазній симетричній СЕ не відбувається обміну енергією між джерелом і навантаженням, оскільки в будь-який момент часу миттєва активна потужність трифазного джерела тотожно дорівнює нулю. Три фазні реактори або три конденсатори обмінюються енергією так, що сумарна енергія, накопичена в трьох фазах реактивного навантаження, залишається постійною в часі. В однофазній СЕ, якщо навантаження реактивне, відбувається обмін енергією між джерелом і навантаженням, миттєва активна потужність змінюється за законом  $\sin^2\theta$ , середня активна потужність за період напруги мережі дорівнює нулю.

Зазначені особливості трифазних і однофазних СЕ свідчать про енергетичну неконкурентоздатність однофазної системи, яка, по суті, є трифазною системою з двома обірваними фазами. Зрозуміло, що під час розгляду процесів обміну енергією в трифазній СЕ, процеси в однофазній СЕ не можуть бути еталоном, навпаки, недоліки однофазної системи виявляються під час її порівняння з трифазною системою, яка вважається еталоном.

### **3.2 Фізичний зміст поняття «реактивна потужність» стосовно трифазних систем електропостачання з нелінійним навантаженням**

Незважаючи на солідний вік терміну «реактивна потужність» («reactive power») [13; 61; 92; 104; 105; 117], його внутрішній зміст і на сьогодні залишається нечітким і суперечливим. Це пояснюється частково тим, що для відповіді на питання в чому полягає фізичний зміст поняття реактивна потужність, необхідно попередньо відповісти на декілька інших запитань, а саме:

- 1) якою є структура розглядуваної системи електропостачання;
- 2) як визначити період повторюваності процесів у розглядуваній СЕ;
- 3) у яких точках СЕ вимірюються миттєві значення струмів і напруг;
- 4) у якій системі координат визначаються узагальнені вектори миттєвих напруг, струмів і реактивної потужності трифазного СЕ;
- 5) як розраховувати миттєві значення активної потужності й модуля вектора миттєвої реактивної потужності;
- 6) якими є одиниці вимірювання модуля вектора миттєвої реактивної потужності.

Окрім перелічених шести запитань, необхідно обґрунтувати декілька припущень:

- потужність втрат енергії в лінії, обумовлена протіканням активної складової струму, і потужність втрат, обумовлена протіканням реактивних струмів, взаємно незалежні;

- впливом індуктивностей кабелів на втрати енергії можна знехтувати зважаючи на його незначність; в інших випадках індуктивність кабелів можна перенести до навантаження;

- відповідно до теореми про мінімум потужності втрат, у симетричній трифазній СЕ з резистивним навантаженням мінімальні втрати енергії, тобто максимально можливий ККД ( $\eta_{\max}$ ) визначаються відношенням потужності КЗ на затискачах навантаження й корисної потужності, що дорівнює середньому значенню потужності навантаження, обчисленому в періоді повторюваності;

- потужність втрат в СЕ, обумовлених потоком енергії від джерела до навантаження, пропорційна квадрату середньої корисної потужності навантаження;

- потужність додаткових втрат, обумовлених реактивною потужністю, дорівнює добутку потужності мінімальних втрат, що відповідають максимально можливому ККД, і відношенню квадрата середньоквадратичного значення реактивної потужності до квадрата середньої корисної потужності;

- потужність додаткових втрат, обумовлених пульсаціями активної потужності, дорівнює добутку потужності мінімально можливих втрат і відношення квадрата середньоквадратичного значення змінної складової миттєвої активної потужності до квадрата середньої корисної потужності;

- у режимах роботи чотирипровідної СЕ, у яких струм нульового проводу відмінний від нуля, виникає четверта складова сумарних втрат, пропорційна добутку опору нульового проводу і квадрату середньоквадратичного значення нульового струму.

У цьому й наступному підрозділах наведено відповіді на зазначені запитання і обґрунтовано прийняті припущення, що дало змогу запропонувати універсальну розрахункову формулу для визначення сумарної потужності втрат, як суми чотирьох складових.

### 3.2.1 Відповіді на попередні питання, що дають змогу сформулювати визначення терміна «реактивна потужність»

1. Еквівалентну схему розглядуваної трифазної СЕ подано на рисунку 3.8.

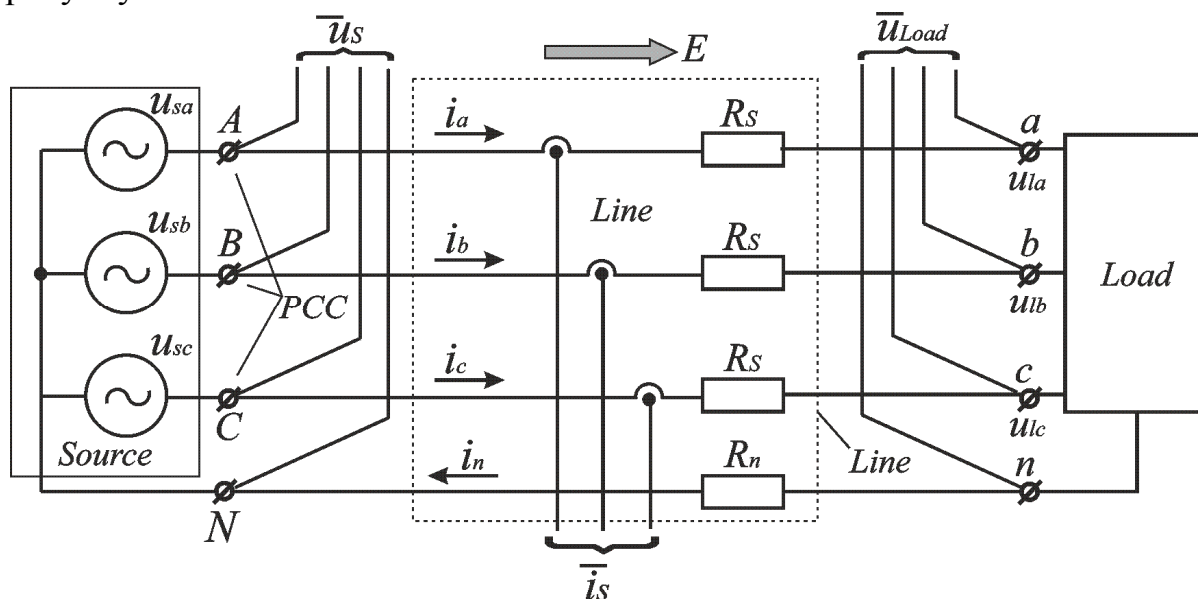


Рисунок 3.8 – Еквівалентна схема трифазної системи електропостачання

Потік енергії в системі спрямований від джерела (*Source*) до навантаження (*Load*) за допомогою чотирипровідної лінії (*Line*). Опір фазного кабелю лінії дорівнює  $R_s$ , а нульового проводу –  $R_n$ . Під час аналізу доцільно розглядати три значення опору нульового проводу:  $R_n = 0, R_s, \infty$ . Джерело становить трифазну систему майже синусоїдальних напруг, симетричну або несиметричну. У кривій напруги можуть міститися вищі гармоніки. Навантаження (*Load*) в загальному випадку містить лінійні та нелінійні елементи, джерела струму й напруги. Зазвичай кожен фазу навантаження можна вважати джерелом струму. Якщо довжини кабелів значні, до навантаження можна віднести індуктивність кабелів.

2. Період повторюваності кривих струмів, напруг, активної й реактивної потужності СЕ – це найменший проміжок часу, у якому укладається ціле число періодів повторюваності зазначених величин. Залежно від цілей розрахунків або експериментів можна обрати будь-який довільний період повторюваності в інтервалі часу від нуля до нескінченності. Найпопулярнішим варіантом є вибір періоду повторюваності, що дорівнює періоду або частині періоду напруги мережі живлення. Однак такий підхід можна бути пов'язати зі значними похибками внаслідок неврахування низькочастотних пульсацій миттєвої активної потужності. На рисунку 3.9 зображено криві миттєвих значень,

напруги й активної потужності, що обумовлюють вибір періоду повторюваності.

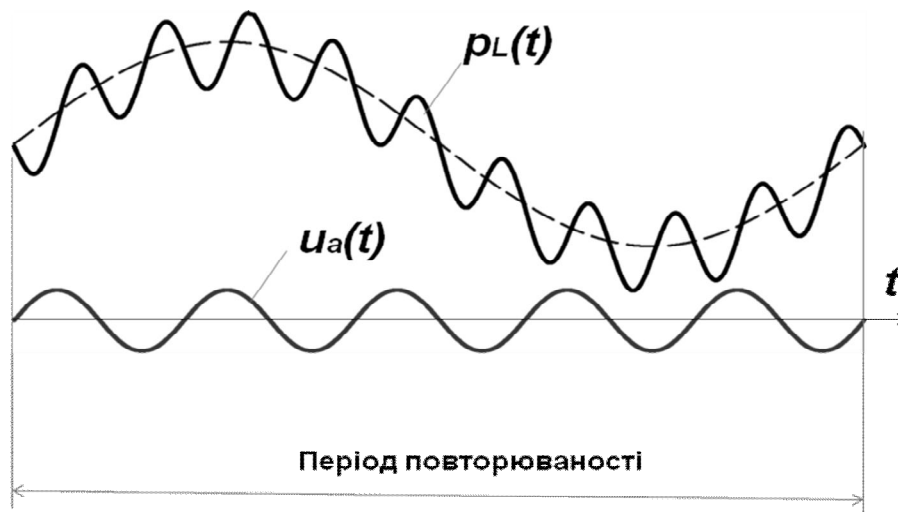


Рисунок 3.9 – Визначення періоду повторюваності

3. Як впливає з еквівалентної схеми трифазної СЕ, поданої на рисунку 3.8, напруги джерела  $u_{sa}$ ,  $u_{sb}$ ,  $u_{sc}$  вимірюються в точці загального приєднання (PCC), а напруги навантаження  $u_{la}$ ,  $u_{lb}$ ,  $u_{lc}$  – на клемі навантаження.

4. Узагальнені вектори напруг  $\vec{u}_S, \vec{u}_L$ , струму  $\vec{i}$  і реактивної потужності  $\vec{q}_S$  визначаються в одній із просторових декартових систем координат [38], наприклад abc за співвідношеннями (2.12), (2.13), (2.14), (2.15).

5. Миттєва активна потужність джерела визначається двома способами – (2.16) і (2.18), а миттєва активна потужність навантаження – (2.17) і (2.19).

Модуль вектора миттєвої реактивної потужності джерела визначається за співвідношенням (2.20).

Як впливає з (2.16) – (2.18) миттєва активна потужність  $i$ , отже, середня за період повторюваності активна потужність можуть змінювати знак, до того ж позитивна активна потужність відповідає позитивному напрямку потоку енергії – від джерела до навантаження, а негативна активна потужність відповідає протилежному напрямку потоку енергії.

Модуль вектора миттєвої реактивної потужності завжди позитивний. Це узгоджується з припущенням, що в трифазній СЕ швидкість передачі енергії й напрям потоку енергії не залежать від реактивної потужності.

Крім модуля вектора миттєвої реактивної потужності, для визначення потужності втрат в СЕ необхідні середнє й середньоквадратичне за період повторюваності значення реактивної потужності.

6. Під час аналізу СЕ використовують величини, подані в таблиці 3.3. Розмірність модуля реактивної потужності – ват (Вт). Можуть використовуватися безрозмірні величини в частках корисної середньої за період повторюваності активної потужності навантаження  $P_{usf}$ , яка у всіх розрахунках та експериментах має дорівнювати заданому значенню.

Таким чином, сформульовано відповіді на всі шість запитань. Перейдемо до припущень.

Таблиця 3.3 – Розмірність реактивної потужності

№	Найменування	Скорочене найменування	Позначення	Розрахункова формула	Розмірність	Примітка
1	Вектор миттєвої реактивної потужності	–	$\vec{q}$	(2.15), (2.20), (2.21)	–	–
2	Модуль вектора миттєвої реактивної потужності	Миттєва реактивна потужність	$ \vec{q} $	(2.20)	Вт	–
3	Миттєва реактивна потужність	–	$q$	(2.20)	Вт	$q =  \vec{q} $
4	Відносна реактивна потужність	–	$q^*$	$q^* = \frac{q}{P_{usf}}$	безрозмірна	–
5	Середня за період повторюваності реактивна потужність	Середня реактивна потужність	$Q_{AV}$	$Q_{AV} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} q dt$	Вт	–
			$Q_{AV^*}$	$Q_{AV^*} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} q^* dt$	безрозмірна	–
6	Середньоквадратична в періоді повторюваності реактивна потужність	Середньоквадратична реактивна потужність	$Q_{RMS}$	$Q_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} q^2 dt}$	Вт	–
			$Q_{RMS^*}$	$Q_{RMS^*} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} q^{*2} dt}$	безрозмірна	–

### 3.2.2 Обґрунтування прийнятих припущень щодо визначення фізичного змісту поняття «реактивна потужність»

1. У просторовій декартовій системі координат вектор активного струму при незмінному векторі напруг джерела не змінюється. Вектори активних і реактивних струмів взаємно перпендикулярні.

2. Втрати в індуктивностях кабелів відсутні. Однак введення індуктивностей призводить до збільшення реактивної потужності і втрат в омичних опорах лінії. Це збільшення в деяких випадках становить частки відсотка, що підтверджують експерименти. Індуктивність кабелів можна перенести в навантаження, не змінюючи точок підімкнення.

3. Теорема про мінімально можливі втрати енергії або максимально можливий ККД СЕ аналогічна теоремі Tevenin, сформульованої в підрозділі 2.2.

4, 5. Четверте й п'яте припущення можна об'єднати в одне припущення стосовно існування пропорції

$$\frac{P_{usf}^2}{\Delta P_{\min}} = \frac{Q_{RMS}^2}{\Delta P_q}, \quad (3.36)$$

звідки

$$\Delta P_q = \frac{Q_{RMS}^2 \cdot \Delta P_{\min}}{P_{usf}^2}. \quad (3.37)$$

Резистивні опори, у яких під дією активного й реактивного струмів виділяється теплова енергія, однакові. Потужності в (3.36) і (3.37) прийняті в квадратах, оскільки, втрати пропорційні квадратам струмів, які, зі свого боку, пропорційні потужностям.

6. Залежність потужності додаткових втрат, обумовлених пульсаціями миттєвої активної потужності, від середньоквадратичного (діючого) значення, обчисленого в періоді повторюваності, змінної складової активної потужності, можна отримати аналітично.

Доведемо це. Графіки активної потужності без пульсацій і з пульсаціями подано на рисунку 3.10, а і 3.10, б відповідно.

Миттєва активна потужність навантаження трифазної СЕ за відсутності пульсацій –

$$p = P_{usf} = \text{const}, \quad (3.38)$$

за наявності пульсацій –

$$p = P_{usf} + P_{\sim m} \cdot \sin \vartheta. \quad (3.39)$$



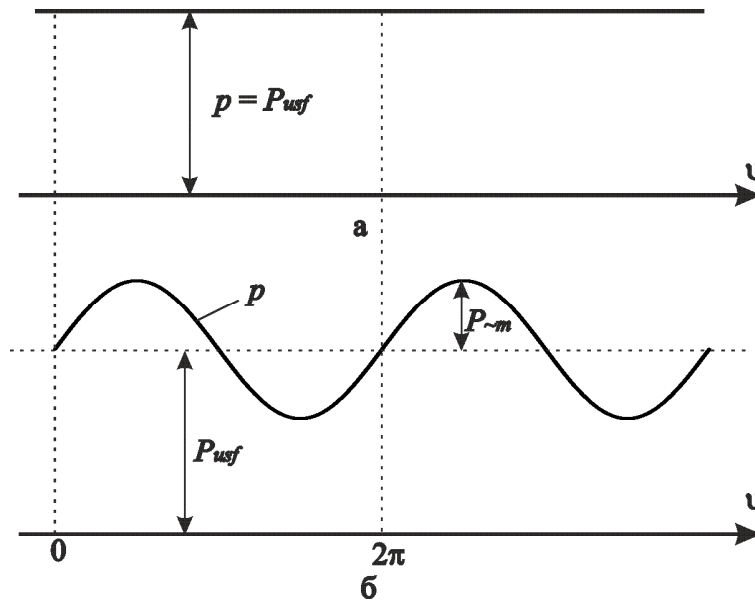


Рисунок 3.10 – Графіки активної потужності без пульсацій (а)  
і з пульсаціями (б)

Вважатимемо, що активний струм кабелю пропорційний миттєвій активній потужності. Потужність втрат у кабелі від активної складової струму за відсутності пульсацій –

$$\Delta p_{=} = \Delta P_{=} = R_S \cdot k \cdot p^2 = R_S \cdot k \cdot P_{usf}^2, \quad (3.40)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

За наявності пульсацій

$$\Delta p_{\sim} = R_S \cdot k \cdot (P_{usf} + P_{\sim m} \cdot \sin \vartheta)^2. \quad (3.41)$$

Період повторюваності графіка активної потужності (відповідно до рисунка 3.10) дорівнює  $2\pi$ . Інтегруючи (3.41) у періоді повторюваності, беручи до уваги незалежність потужності втрат від частоти пульсацій реактивної потужності, отримаємо

$$\Delta P_{\sim} = \frac{1}{2\pi} R_S \cdot k \cdot \left( \int_0^{2\pi} [P_{usf}^2 + 2 \cdot P_{usf} \cdot P_{\sim m} \cdot \sin \vartheta] d\vartheta + \int_0^{2\pi} P_{\sim m}^2 \cdot \sin^2 \vartheta d\vartheta \right). \quad (3.42)$$

Ураховуючи, що другий інтеграл у дужках дорівнює нулю, визначимо різницю потужності втрат у двох розглянутих варіантах графіка миттєвої активної потужності:

$$\begin{aligned} \Delta P_{puls} &= \Delta P_{\sim} - \Delta P_{=} = \frac{1}{2\pi} R_S \cdot k \cdot \int_0^{2\pi} 2 \cdot P_{\sim m} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos 2\vartheta) d\vartheta = \\ &= R_S \cdot k \cdot \frac{P_{\sim m}^2}{2} = R_S \cdot k \cdot P_{pulsRMS}^2. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Зі співвідношення (3.43) випливає, що додаткова потужність втрат, обумовлена пульсаціями миттєвої активної потужності, пропорційна квадрату середньоквадратичного (діючого) значення змінної складової активної потужності.

7. Припущення про потужність втрат у нульовому проводі чотирипровідної СЕ очевидне [62].

Припущення 5, 6, 7 додатково обґрунтовано у наступному підрозділі, що дало змогу отримати розрахункове співвідношення для визначення сумарної потужності втрат трифазної чотирипровідної СЕ, як суми чотирьох складових потужності втрат.

### 3.2.3 Визначення реактивної потужності

Аналіз залежності обчислених в періоді повторюваності значень середньоквадратичної реактивної потужності й середньої (за той самий період часу) потужності втрат у СЕ дає змогу сформулювати декілька визначень реактивної потужності, що обумовлюються відповідями на шість запитань й прийнятими припущеннями.

Наведемо декілька можливих визначень.

1. У тривимірній системі координат вектор миттєвої реактивної потужності дорівнює векторному добутку просторового вектора напруги й просторового вектора струму трифазної СЕ.

2. Миттєва реактивна потужність дорівнює модулю вектора миттєвої реактивної потужності. Середнє й середньоквадратичне значення реактивної потужності обчислюються шляхом інтегрування в періоді повторюваності кривої миттєвої реактивної потужності.

3. У трифазній СЕ одночасно відбуваються два практично незалежні процеси обміну енергією. Перший процес – це обмін енергією між джерелом і навантаженням із перетворенням енергії. Швидкість першого обміну чисельно дорівнює миттєвій або середній за період повторюваності активній потужності. Знаком активної потужності визначається напрям потоку енергії. Другий процес – це обмін енергією між фазами навантаження для симетричних СЕ або між джерелом і навантаженням для несиметричних СЕ без впливу на передавання основного потоку енергії, швидкість якого дорівнює миттєвій реактивній потужності. Другий обмін фактично не впливає на перший, проте спричиняє додаткові втрати енергії в лінії, пропорційні квадрату середньоквадратичного значення реактивної потужності.

4. Реактивна потужність – це розрахункова величина, що визначає швидкість обміну енергією між фазами навантаження або навантаженням і джерелом трифазної СЕ без впливу на передавання основного потоку енергії, відношення квадрата середньоквадратичного значення якої до квадрата корисної потужності, помножене на величину мінімально можливої потужності втрат, дорівнює одній зі складових потужності додаткових втрат у СЕ.

Зазначимо, що можливість обміну енергією між фазами трифазної СЕ за відсутності потоку енергії від джерела до навантаження або в зворотному напрямі показано в [27] для випадку підімкнення до джерела трифазної батареї конденсаторів або блока трифазних реакторів.

### **3.3 Складові сумарної потужності втрат у трифазних системах електропостачання**

#### **3.3.1 Потужність втрат і реактивна потужність у трифазних системах електропостачання при симетричних синусоїдальних напругах джерела**

Фізичне тлумачення реактивної потужності в колах з нелінійним навантаженням протягом майже столітнього періоду (після опублікованих праць W. Lyon [117], S. Fryze [104; 105], S. Budeanu [100]) є предметом полеміки, де висловлюються різні, здебільшого протилежні, думки. У наш час у роботах Н. Akagi, Y. Kanazava, A. Nubae [92; 94] і їхніх послідовників [28; 31; 46; 91; 93; 110; 111; 118; 122; 123; 126] сформувалася теорія потужності (power theory), що, на відміну від попередніх теорій, базується на поняттях миттєвих струмів, напруг, активної й реактивної потужностей, які аналізуються в тривимірних нерухомих або обертових декартових системах координат.

У теорії миттєвої активної й реактивної потужностей (instantaneous active and reactive power theory) розглядаються, насамперед, трифазні трипровідні або чотирипровідні СЕ. До того ж однофазна система є різновидом трифазної з резисторами нескінченно великого опору в двох із трьох фаз. Такий підхід виключає помилкові спроби поширення результатів аналізу однофазних систем на трифазні СЕ в частині обміну енергією між трифазною мережею й реактивним навантаженням.

Загальноприйнятими твердженнями теорії миттєвих активної й реактивної потужностей можна вважати такі положення:

1. У просторовій тривимірній декартовій системі координат  $a, b, c$  результуючий вектор миттєвої напруги трифазної системи визначається як

сума трьох векторів, спрямованих за осями  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , модулі яких дорівнюють миттєвим значенням фазних напруг (3.28).

2. Результируючий вектор миттєвих фазних струмів трифазної системи визначається аналогічно до визначення результируючого вектора напруг (2.14).

3. Миттєва активна потужність розглядається, як швидкість передачі енергії від мережі до навантаження або від навантаження до мережі. У першому випадку миттєва активна потужність позитивна, у другому – негативна. Можна використати два способи визначення миттєвої активної потужності (3.31). Миттєва активна потужність – це скалярна величина, модуль якої дорівнює швидкості передачі енергії, а знак визначає напрям потоку енергії.

4. Вектор миттєвої реактивної потужності визначається, як векторний добуток результируючого вектора напруги на результируючий вектор струму в просторовій декартовій системі координат (2.15).

5. Реактивна потужність є розрахунковою величиною, її значення не впливає на швидкість передачі електричної енергії в СЕ між джерелом і навантаженням [64].

Наведені положення теорії миттєвої потужності не пояснюють такі питання: чи залежить величина реактивної потужності від ККД або (що те ж саме) від втрат енергії в СЕ; чи змінюється характер цієї залежності унаслідок причин виникнення реактивної потужності, таких як кут зсуву фазного струму навантаження відносно фазної напруги; пофазна асиметрія резистивних навантажень; нелінійність навантаження; несинусоїдальність напруги джерела; несиметрія напруги джерела.

Еквівалентну схему системи електропостачання подано на рисунку 3.11.

У розглядуваній схемі енергія передається від трифазного джерела напруги до навантаження *Load* або в зворотному напрямі. Напруги трифазного джерела можуть бути синусоїдальними симетричними, синусоїдальними несиметричними й симетричними несинусоїдальними. Під симетрією розуміємо конгруентність фазних напруг і наявність у них симетрії того чи іншого роду.

Навантаження, зі свого боку, може бути симетричним або несиметричним резистивним, симетричним або несиметричним змішаним, симетричним або несиметричним нелінійним. У середині блока *Load* можуть міститися джерела струму й напруги, а також накопичувачі енергії.

Кабельна лінія, що з'єднує джерело з навантаженням, може бути чотирипровідною або трипровідною. Омічні опори кожної фази лінії позначені на схемі  $R_s$ , а нульового проводу –  $R_n$ . Індуктивність лінії переноситься до навантаження, оскільки відносна величина падіння напруги на індуктивності є незначною і прямо не впливає на втрати енергії в СЕ.

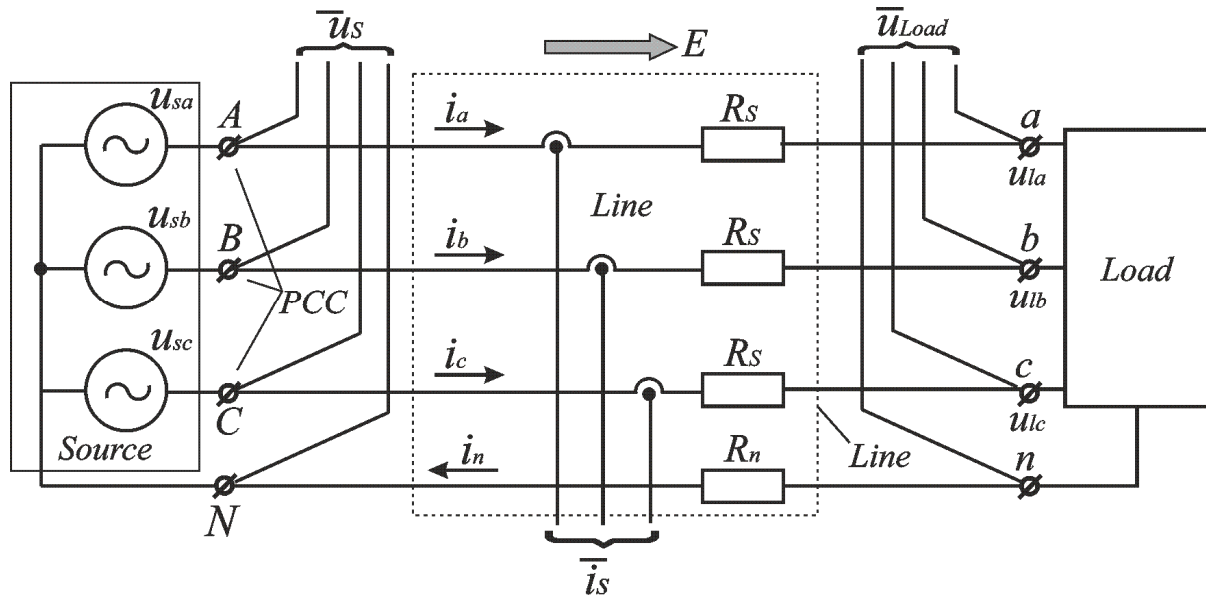


Рисунок 3.11 – Еквівалентна схема системи електропостачання

Система електропостачання, що розглядається, забезпечена давачами фазних напруг джерела  $\vec{u}_s$  і навантаження  $\vec{u}_L$ , а також давачами фазних струмів  $\vec{i}_s$ . Миттєвий струм нульового проводу визначається, як сума миттєвих значень фазних струмів:

$$i_n = i_a + i_b + i_c. \quad (3.44)$$

Як було зазначено вище, реактивну потужність СЕ можна визначити різними способами, наприклад запропонованими S. Fryze, S. Budeanu, О. Маєвським, Н. Akagi або іншими [28]. Критерієм доцільності того чи іншого визначення є можливість використати розраховану відповідно до визначення реактивну потужність для кількісної оцінки електромагнітних процесів у СЕ. До того ж інтегральні значення необхідно визначати в періоді повторюваності за модулем вектора миттєвої реактивної потужності, що розраховується за Н. Akagi.

З огляду на те, що від значення реактивної потужності не залежить швидкість і кількість енергії, яка передається в СЕ, і що втрати енергії

обумовлюються величиною реактивної потужності, пропонується розглядати:

- миттєву реактивну потужність, що дорівнює модулю просторового вектора реактивної потужності, який визначається за співвідношенням (3.32);

- середньоквадратичне значення модуля вектора миттєвої реактивної потужності, що обчислюється в періоді повторюваності

$$Q_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_{rep}} \cdot \int_t^{t+T_{rep}} |\vec{q}|^2 dt}, \quad (3.45)$$

де  $T_{rep}$  – період повторюваності, що загалом не дорівнює періоду напруги мережі (див. підрозділ 2.2);

- середнє значення модуля вектора реактивної потужності

$$Q_{AV} = \frac{1}{T_{rep}} \cdot \int_t^{t+T_{rep}} |\vec{q}| dt. \quad (3.46)$$

Зазначимо, що миттєві, середньоквадратичні й середні значення реактивної потужності, як і потужність втрат, не можуть бути негативними.

Розрахунки й вимірювання миттєвої реактивної потужності необхідно виконати, відповідно до (3.32) використовуючи напруги мережі  $\vec{u}_S$  (див. рис. 3.11), а не  $\vec{u}_L$ , бо в іншому разі не буде враховано додаткові втрати, зумовлені реактивною потужністю  $\Delta P_Q^*$ .

Загалом, під потужністю додаткових втрат  $\Delta P_{add}$  розуміють різницю між сумарною потужністю втрат енергії і потужністю мінімально можливих втрат, що визначаються відповідно до теореми про мінімум втрат енергії трифазної СЕ ( $\Delta P_{add} = \Delta P_{\Sigma} - \Delta P_{min}$ ).

Припустимо, що обчислена в періоді повторюваності сумарна потужність втрат електроенергії  $\Delta P_{\Sigma}$  є сумою трьох складових: мінімально можливої потужності втрат  $\Delta P_{min}$ , яку визначають за постійної швидкості передавання енергії; додаткової потужності втрат, яка є функцією діючого значення модуля миттєвої реактивної потужності  $\Delta P_Q$ ; додаткової потужності втрат, обумовленої пульсаціями в кривій миттєвої активної потужності  $\Delta P_{puls}$ :

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{min} + \Delta P_{add} = \Delta P_{min} + \Delta P_Q + \Delta P_{puls} \Big|_{P_{usf} = const}. \quad (3.47)$$

Умова  $P_{usf} = const$  визначає коректність співставлення різних варіантів трифазних СЕ, за яких можливе виникнення додаткових втрат енергії.

Поділивши обидві частини (3.47) на  $P_{usf}$  – середню за період повторюваності корисну активну потужність навантаження, отримаємо:

$$\Delta P_{\Sigma*} = \Delta P_{\min*} + \Delta P_{Q*} + \Delta P_{puls*} \Big|_{P_{usf} = const} \quad (3.48)$$

Відповідно до (3.48)  $\Delta P_{\min*}$  визначається з теореми про мінімум потужності втрат (див. підрозділ 2.2) за співвідношенням (2.34). Величина  $\Delta P_{Q*}$  є функцією середньоквадратичного значення за період повторюваності реактивного струму, миттєве значення якого, зі свого боку, пропорційне миттєвому значенню модуля реактивної потужності. Із цього випливає, що

$$\Delta P_{Q*} = f(Q_{RMS*}). \quad (3.49)$$

Величина  $\Delta P_{puls*}$  залежить від відносної амплітуди пульсацій активної потужності  $\Delta_P$  [13] або від амплітуди пульсацій струму  $\Delta_I$  [26]:

$$\Delta P_{puls*} = f_1\left(\Delta_P, \frac{P_{SC}}{P_{usf}}\right) = f_2\left(\Delta_I, \frac{P_{SC}}{P_{usf}}\right). \quad (3.50)$$

Величини  $\Delta_P$  і  $\Delta_I$  пов'язані при заданій величині  $\eta_{AVreal}$  наближенням, але досить точним співвідношенням [25]:

$$\Delta_P \cong \Delta_I - \Delta_I \cdot \left( \frac{1}{\eta_{AVreal}} - 1 \right). \quad (3.51)$$

Розглянемо приклад. Нехай  $\eta_{AVreal} = 0,836$ . Цьому значенню в [25] відповідає значення  $k_{sc} = 8$ ,  $\Delta_I = 0,5$ . За співвідношенням (3.51) при  $\Delta_I = 0,5$  знаходимо значення  $\Delta_P$ :

$$\Delta_P \cong 0,5 - 0,5 \cdot \left( \frac{1}{0,836} - 1 \right) = 0,402. \quad (3.52)$$

У [46] для  $P_{SC}/P_{usf}$ ,  $\Delta_P = 0,4$  знаходимо:  $\eta_{AVreal} = 0,833$ , що майже не відрізняється від початкового значення.

Базові припущення, справедливості яких необхідно перевірити за допомогою Matlab-моделі, математично відображені співвідношеннями (3.48) – (3.51), проте варто сформулювати основні положення теорії, щоб уточнити завдання для віртуальних експериментів:

1. Період повторюваності процесів у СЕ може бути довільним і не обов'язково таким, що дорівнює періоду напруги джерела.

2. Просторові вектори миттєвих струмів, напруг і реактивної потужності трифазної СЕ розглядаються в просторових декартових системах координат. Однофазна система – окремий випадок трифазної.

3. За розрахункове значення миттєвої реактивної потужності приймаємо модуль просторового вектора реактивної потужності.

Розглянемо спочатку спрощений варіант – трифазну симетричну систему з синусоїдальними напругами джерела й лінійним змішаним навантаженням. Період повторюваності напруг і струмів приймемо рівним періоду напруги джерела. Розташування давачів напруги й струмів у еквівалентній схемі зображено на рисунку 3.11. Миттєві значення напруг джерела й струмів навантаження відповідають співвідношенням (3.28), (3.29).

Середня активна потужність за період повторюваності дорівнює корисній середній потужності навантаження:

$$P_{AV} = P_{usf} = \frac{3}{2} \cdot U_{mL} \cdot I_m \cdot \cos \varphi, \quad (3.53)$$

де  $U_{mL}$  – амплітуда фазної напруги навантаження.

Середнє за період повторюваності значення модуля миттєвої реактивної потужності

$$Q_{AV} = \frac{3}{2} \cdot U_m \cdot I_m \cdot \sin \varphi. \quad (3.54)$$

Прийmemo, що корисна активна потужність ( $P_{usf}$ ) що дорівнює середній активній потужності навантаження, не змінюється в разі змінювання кута  $\varphi$ . Реальний коефіцієнт корисної дії при такому допущенні визначається за співвідношенням [27]:

$$\eta_{real} = \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{\eta_{max}} - 1 \right) \cdot (1 + tg^2 \varphi)} = \frac{1}{1 + \Delta P_{min*} \cdot (1 + tg^2 \varphi)}, \quad (3.55)$$

де максимально можливий ККД СЕ однозначно залежить від відношення  $P_{SC}/P_{usf}$ ;

$$tg^2 \varphi \cong \frac{Q_{RMS}^2}{P_{usfRMS}^2}, \quad (3.56)$$

де

$$\varphi = \arccos \left( \frac{u_{sa}}{|\vec{u}_s|} \cdot \frac{i_{sa}}{|\vec{i}_s|} + \frac{u_{sb}}{|\vec{u}_s|} \cdot \frac{i_{sb}}{|\vec{i}_s|} + \frac{u_{sc}}{|\vec{u}_s|} \cdot \frac{i_{sc}}{|\vec{i}_s|} \right) - \quad (3.57)$$



кут зсуву між просторовими векторами напруги та струму [4];  $P_{usfRMS}$  – середньоквадратичне значення активної потужності, що в трифазній симетричній системі з лінійним навантаженням дорівнює середній корисній потужності, обчислений в періоді повторюваності  $P_{usf}$ . Формула (3.56) є наближеною, оскільки коректність розрахування реактивної потужності передбачає вимірювання значень фазних напруг на затискачах джерела живлення, а не на затискачах навантаження. Похибка, що виникає при цьому, буде незначною.

Інша очевидна формула для визначення реального ККД –

$$\eta_{real} = \frac{P_{usf}}{P_{usf} + \Delta P_{\Sigma}} = \frac{1}{1 + \Delta P_{\Sigma*}}, \quad (3.58)$$

де 
$$\Delta P_{\Sigma*} = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{usf}}. \quad (3.59)$$

Із (3.55) – (3.59) отримуємо залежність сумарної потужності втрат від середньоквадратичного значення реактивної потужності

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma*} &= \left( \frac{1}{\eta_{max}} - 1 \right) \cdot \left( 1 + Q_{RMS*}^2 \right) \Big|_{P_{usf} = const} = \\ &= \Delta P_{min*} \cdot \left( 1 + Q_{RMS*}^2 \right) \Big|_{P_{usf} = const} \end{aligned} \quad (3.60)$$

Зазначимо, що в (3.60) введено середньоквадратичне за період повторюваності значення модуля просторового вектора реактивної потужності відповідно до співвідношення (3.48), до того ж

$$Q_{RMS*} = \frac{Q_{RMS}}{P_{usf}}. \quad (3.61)$$

Коректність співвідношення (3.60) перевірено за допомогою комп'ютерного моделювання, результати якого наведено в підрозділі 5.3.

### 3.3.2 Залежність додаткових втрат у трифазних системах електропостачання від пульсацій миттєвої активної потужності

Співвідношення (3.60) не поширюється на СЕ, у яких миттєва активна потужність може змінюватися за довільним законом, наприклад коли навантаження асиметричне або містить нелінійні елементи, тому потрібно отримати уточнене розрахункове співвідношення, що зв'язує потужність додаткових втрат, обумовлену реактивною потужністю й пульсаціями активної потужності, з причинами, що їх обумовлюють.

Розглянемо трифазну трипровідну еквівалентну схему СЕ, що відповідає схемі на рисунку 3.11 при обриві нульового проводу.

У разі симетричного нелінійного навантаження в кривій миттєвої активної потужності наявні вищі гармоніки, кожна з яких впливає на потужність додаткових втрат. Ефективне значення корисної потужності навантаження, що обчислюється в періоді повторюваності, буде таким:

$$P_{usfRMS} = \sqrt{\frac{1}{T_{rep}} \cdot \int_t^{t+T_{rep}} p_L^2 dt} = \sqrt{P_{usf}^2 + \frac{1}{2} \sum_n P_{im}^2} = \sqrt{P_{usf}^2 + P_{pulsRMS}^2}, \quad (3.62)$$

де  $P_{im}$  – амплітуда  $i$ -ої гармоніки в кривій миттєвої активної потужності;  $P_{pulsRMS}$  – сумарне середньоквадратичне значення пульсації миттєвої активної потужності;  $n$  – номер гармоніки.

Підставивши (3.57) і (3.62) в (3.55), якщо припустимо, що  $P_{usf}^2 + P_{pulsRMS}^2 \approx P_{usf}^2$ , у знаменнику правої частини, отримаємо уточнене розрахункове співвідношення, що поєднує складові потужності додаткових втрат із величинами, які їх спричиняють:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma*} &= \left( \frac{1}{\eta_{\max}} - 1 \right) \cdot \left( 1 + Q_{RMS*}^2 + P_{pulsRMS*}^2 \right) \Big|_{P_{usf} = \text{const}} = \\ &= \Delta P_{\min*} \cdot \left( 1 + Q_{RMS*}^2 + P_{pulsRMS*}^2 \right) \Big|_{P_{usf} = \text{const}} \end{aligned} \quad (3.63)$$

Отримане співвідношення (3.63) відповідає співвідношенню (3.48) і дає змогу зробити висновок про те, що сумарні втрати трифазної трипровідної СЕ з симетричним джерелом можна подати у вигляді суми трьох складових: мінімально можливі втрати, обумовлені передаванням енергії від джерела до навантаження, втрати, обумовлені протіканням реактивних струмів, і втрати, обумовлені пульсаціями кривої миттєвої активної потужності. Дві останні складові втрат пропорційно залежні від мінімально можливих втрат.

Розрахункове співвідношення (3.63) перевірялось за допомогою Matlab-моделі трифазної СЕ (див. підрозділ 5.3).

### 3.3.3 Складові сумарної потужності втрат у трифазній чотирипровідній системі електропостачання при симетричних синусоїдальних напругах джерела

Формула (3.63) дає змогу досить точно розрахувати сумарну потужність втрат трифазної трипровідної СЕ з трифазним симетричним джерелом синусоїдальних напруг. Для трифазної чотирипровідної СЕ

необхідно окремо враховувати потужність втрат, обумовлених протіканням струму в нульовому проводі, тому співвідношення (4.49) можна доповнити четвертою складовою:

$$\Delta P_{\Sigma^*} = \Delta P_{\min^*} + \Delta P_{Q^*} + \Delta P_{puls^*} + \Delta P_{n^*} \Big|_{P_{usf} = const} \quad (3.64)$$

$$\text{де} \quad \Delta P_{n^*} = \frac{\Delta P_n}{P_{usf}} = \frac{R_n}{P_{usf} \cdot T} \int_t^{t+T} i_n^2 dt - \quad (3.65)$$

відносна потужність додаткових втрат, обумовлених протіканням струму  $i_n$  в нульовому проводі.

Співвідношення (3.64) можна подати в іншому вигляді:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma^*} &= \left( \frac{1}{\eta_{\max}} - 1 \right) \cdot \left( 1 + Q_{RMS^*}^2 + P_{\Sigma RMS^*}^2 \right) + \Delta P_{n^*} \Big|_{P_{usf} = const} = \\ &= \Delta P_{\min^*} \cdot \left( 1 + Q_{RMS^*}^2 + P_{\Sigma RMS^*}^2 \right) + \Delta P_{n^*} \Big|_{P_{usf} = const} \end{aligned} \quad (3.66)$$

Співвідношення (3.66) можна вважати універсальним для визначення потужності сумарних втрат, а також її складових для трифазних систем електропостачання з симетричним джерелом синусоїдальних напруг.

Коректність розрахунку за співвідношенням (3.66) перевірялась за допомогою Matlab-моделі трифазної СЕ (див. підрозділ 5.3.3).

Зупинимось на деяких проміжних результатах перевірки розрахунку за (3.66), що впливають з аналізу результатів, наведених у додатку Б.

1. Доведено, що припущення, прийняте при одержанні співвідношення (3.66), є наближеним, але таким, що дає змогу з достатньою точністю розкласти сумарну потужність втрат на чотири окремі складові, обумовлені особливостями електромагнітних процесів в трифазних СЕ.

2. Співвідношення (3.66) дає змогу з максимальною точністю (відносна похибка не перевищує 0,5 %) розраховувати сумарну потужність втрат шляхом визначення суми її складових, обумовлених електромагнітними процесами трифазної трипровідної СЕ з симетричними синусоїдальними напругами джерела.

3. Відносна похибка розрахунків за наближеною формулою в деяких режимах роботи трифазної чотирипровідної СЕ, наприклад при нелінійному асиметричному навантаженні, може становити до 7–9 %. Похибка виникає внаслідок відсутності обліку взаємного впливу

електромагнітних процесів у лінійних проводах трифазної СЕ і в нульовому проводі. Те саме стосується режимів роботи трифазної СЕ, коли напруги джерела несиметричні й несинусоїдальні.

4. Потребує уточнення розрахункова формула для визначення сумарної потужності втрат (3.66), що забезпечить мінімізацію похибки для всіх можливих варіантів трифазних СЕ з будь-якими параметрами трифазного джерела й навантаження.

### 3.3.4 Уточнення співвідношення для визначення сумарної потужності втрат у трифазній системі електропостачання

Різні режими роботи трифазного джерела (симетричний, несиметричний, синусоїдальний, несинусоїдальний), а також різні варіанти навантажень (симетричне; асиметричне; лінійне (резистивне, реактивне, змішане); нелінійне), а також значення опору нульового проводу чотирипровідної СЕ і напрям енергетичного потоку у живлячих кабелях обумовлюють 279 варіантів роботи СЕ, під час яких виникають додаткові втрати енергії (див. підрозділ 3.2) [45]. Розрахункова формула (3.66), що враховує складові потужності додаткових втрат енергії, дає змогу з високою точністю розрахувати сумарну потужність трифазних трипровідних СЕ (а також чотирипровідних СЕ при  $R_n = 0$ ) з симетричним джерелом трифазних синусоїдальних напруг [24]. Однак, як показали експерименти, для інших випадків похибка розрахування за (3.66) може перевищувати 7 %. У цьому підрозділі уточнюється розрахункова формула (3.66) для трифазних чотирипровідних СЕ при  $R_n \neq 0$ , а також для СЕ в несиметричному режимі роботи трифазного джерела.

1. Розглянемо трифазну чотирипровідну СЕ (за еквівалентною схемою на рис. 3.8) при  $R_n = R_s$ .

Перевірка формули (3.66) на Matlab-моделі (див. підрозділ 5.3.3) [24] показала істотну розбіжність результатів щодо визначення складової потужності втрат внаслідок протікання струму в нульовому проводі:

$$\left( \frac{1}{\eta_{real}} - 1 \right) - \Delta P_{min*} \cdot (1 + Q_{RMS*}^2 + P_{pulsRMS*}^2) > I_{nRMS}^2 \cdot R_n, \quad (3.67)$$

де  $I_{nRMS}$  – середньоквадратичне (обчислене в періоді повторюваності) значення струму в нульовому проводі;  $\eta_{real}$  – дійсний ККД певної СЕ при сталому режимі роботи.

Встановимо причину, що спричиняє розбіжність результатів.

У трифазних трипровідних СЕ втрати енергії, обумовлені протіканням струму у фазних кабелях, в будь-який момент часу можуть бути виражені через модуль результуючого вектора струму мережі:

$$\Delta p_{\Sigma 3} = |\vec{i}_S|^2 \cdot R_S = i_S^2 \cdot R_S, \quad (3.68)$$

$$\text{де} \quad i_S^2 = i_a^2 + i_b^2 + i_c^2. \quad (3.69)$$

Інтегруючи (3.68) в періоді повторюваності, можна визначити середню потужність втрат:

$$\Delta P_{\Sigma 3} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i_S^2 \cdot R_S dt. \quad (3.70)$$

Через модуль результуючого вектора струму мережі можна також виразити миттєву реактивну й миттєву активну потужності [45].

У трифазних чотирипровідних СЕ (у разі співпадіння значень опору нульового проводу та опору лінії) з'являється додаткова складова втрат, обумовлена протіканням струму в нульовому проводі

$$\Delta p_{\Sigma 4} = (i_S^2 + i_n^2) \cdot R_S. \quad (3.71)$$

Беручи до уваги, що

$$i_n^2 = (i_a + i_b + i_c)^2, \quad (3.72)$$

отримаємо:

$$\Delta p_{\Sigma 4} = 2R_S \cdot (i_S^2 + i_a \cdot i_b + i_a \cdot i_c + i_b \cdot i_c). \quad (3.73)$$

Порівняємо дві чотирипровідні СЕ: із нульовим опором четвертого проводу й із опором четвертого проводу, що дорівнює опору лінії.

При  $R_n = 0$  і  $\Delta P_{n*} = 0$  співвідношення (3.66) забезпечує точний результат.

При обліку опору  $R_n$  поява струму в нульовому проводі призводить до зміни значення струмів лінії, проте майже не змінює модуль результуючого струму  $i_S$ . При цьому відбувається зменшення кута зсуву між просторовими результуючими векторами напруги та струму (3.57).

У наслідок цього зменшується середньоквадратична реактивна потужність і збільшується середня активна потужність. Оскільки квадрат середньоквадратичної реактивної потужності обумовлюється додатковими втратами, то втрати, спричинені реактивною потужністю, зменшуються. Збільшення середньої активної потужності СЕ не призводить до збільшення змінної складової миттєвої активної потужності. Навпаки: спостерігається її незначне зменшення, унаслідок якого втрати, зумовлені пульсаціями активної потужності, незначно зменшуються.

Формула (3.66) коректна тоді, коли не спостерігається взаємний вплив електромагнітних процесів у лініях і в нульовому проводі СЕ. Тобто: якщо прийняти, що збільшення опору нульового проводу не спричиняє змінювання середньої активної і середньоквадратичної реактивної потужностей. У цьому разі спочатку потрібно визначити  $Q_{RMS*}$  і  $P_{pulsRMS*}$  у режимі  $R_n = 0$ , а потім підставити отримані значення у формулу (3.66). Однак такий спосіб розрахування не відображає обліку взаємовпливу й спотворює уявлення про процеси в чотирипровідних СЕ.

Найдоцільніше ввести в (3.66) додаткову складову, що враховує взаємний вплив електромагнітних процесів у лініях і в нульовому проводі ( $\Delta P_{mut*}$ ):

$$\Delta P_{\Sigma*} = \Delta P_{min*} \cdot \left(1 + Q_{RMS*}^2 + P_{pulsRMS*}^2\right) + \Delta P_{n*} + \Delta P_{mut*} \Big|_{P_{usf} = const} \quad (3.74)$$

Для вираження додаткової складової можна використати припущення, що в разі додавання опору в нульовий провід змінюється кут зсуву між просторовими векторами напруги та струму, а модуль просторового вектора струму не змінюється. Тоді коефіцієнт, що спричиняє змінювання першого додатка в рівнянні (3.74), буде пропорційним до відношення квадратів косинусів кута зсуву після і до додавання опору до нульового проводу:

$$k \cong \frac{\cos^2 \varphi_{R_n=R_S}}{\cos^2 \varphi_{R_n=0}}. \quad (3.75)$$

Оскільки співвідношення (3.75) пов'язане тільки з першою складовою рівняння (3.66), отримаємо співвідношення для розрахування додаткової складової:

$$\Delta P_{mut*} = \Delta P_{min*} \cdot \left(1 + Q_{RMS*}^2 + P_{pulsRMS*}^2\right) \cdot (k - 1). \quad (3.76)$$

2. Несиметричний режим роботи трифазного джерела за еквівалентною схемою на рисунку 3.8. Розглянемо найпростіший випадок, коли несиметрія напруг джерела задається за допомогою коефіцієнтів  $k_a, k_b, k_c$

$$\begin{aligned} u_{sa} &= k_a \cdot U_m \cdot \sin(\vartheta), \\ u_{sb} &= k_b \cdot U_m \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right), \\ u_{sc} &= k_c \cdot U_m \cdot \sin\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (3.77)$$

що можуть бути пов'язані будь-якою закономірністю.

Розглянемо випадок, коли трифазне навантаження на еквівалентній схемі рисунку 3.8 є симетричним і резистивним:

$$k_l \cdot R_{la} = k_l \cdot R_{lb} = k_l \cdot R_{lc} = k_l \cdot R_l, \quad (3.78)$$

де  $k_l$  – коефіцієнт пропорційності, прийнятий для забезпечення незмінюваності значення середньої корисної потужності.

Форма подання уточненого співвідношення для визначення сумарних втрат у цьому режимі відповідає (3.74). Завдання зводиться до визначення коефіцієнта  $k$ .

*Трифазна трипровідна СЕ.* Експеримент на моделі (див. підрозділ 5.3) показав, що асиметрія напруг джерела спричиняє змінювання (зменшення) відношення потужності резистивного короткого замикання до корисної потужності навантаження, оскільки зменшується потужність резистивного КЗ трифазної СЕ. Таким чином, отримаємо вже нову СЕ з новим значенням мінімально можливих втрат, тому для відновлення попереднього значення потужності резистивного КЗ введемо в опір лінії поправний коефіцієнт  $k_s$ :

$$R_{line} = k_s \cdot R_s. \quad (3.79)$$

У разі виконання рівності

$$k_l = k_s \quad (3.80)$$

потужність резистивного КЗ набуває початкового значення.

У цьому разі відносна сумарна потужність втрат дорівнює мінімально можливим втратам початкової СЕ (без введення коефіцієнта  $k_s$ ). Тоді мінімально можливі втрати нової СЕ (із врахуванням коефіцієнта  $k_s$ )

$$\Delta P_{\min}^* = \frac{\Delta P_{\min}^*}{1 + Q_{RMS}^{2/} + P_{pulsRMS}^{2/}}, \quad (3.81)$$

де  $Q_{RMS}^{2/}$ ,  $P_{pulsRMS}^{2/}$  – середньоквадратична реактивна й середньоквадратична активна потужності пульсацій нової СЕ відповідно.

З урахуванням того, що потужності резистивного КЗ початкової й нової СЕ відрізняються, запишемо співвідношення для визначення поправного коефіцієнта:

$$k = \frac{1}{1 + Q_{RMS}^{2/} + P_{pulsRMS}^{2/}} \cdot \frac{P_{SC}^*}{P_{SC}}, \quad (3.82)$$

де

$$P_{SC} = \frac{1}{T \cdot R_s} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} \left( u_{sa}^2 + u_{sb}^2 + u_{sc}^2 - \frac{(u_{sa} + u_{sa} + u_{sa})^2}{3} \right) dt - \quad (3.83)$$

потужність резистивного КЗ початкової СЕ, що відповідає меншому значенню. Проінтегруємо (4.86) в періоді повторюваності з урахуванням (3.78):

$$P_{SC} = \frac{U_m^2}{6R_s} \cdot (2k_a^2 + 2k_b^2 + 2k_c^2 + k_a k_b + k_b k_c + k_c k_a); \quad (3.84)$$

$$P_{SC}' = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_m^2}{R_s} - \quad (3.85)$$

потужність резистивного КЗ нової СЕ, що відповідає відновленому значенню.

Оскільки відношення

$$\frac{1 + Q_{RMS*}^2 + P_{pulsRMS*}^2}{1 + Q_{RMS*}'^2 + P_{pulsRMS*}'^2} \approx 1, \quad (3.86)$$

можна отримати наближене співвідношення для розрахування сумарної потужності втрат:

$$\Delta P_{\Sigma*} \cong \Delta P_{\min*} \cdot \frac{P_{SC}'}{P_{SC}}. \quad (3.87)$$

З урахуванням (3.84) і (3.85)

$$\Delta P_{\Sigma*} \cong \frac{9P_{\min*}}{2k_a^2 + 2k_b^2 + 2k_c^2 + k_a k_b + k_b k_c + k_c k_a}. \quad (3.88)$$

Співвідношення (3.75) і (3.87) можуть бути застосовані для визначення потужності сумарних втрат трифазної чотирипровідної СЕ при  $R_n = 0$ , для якої

$$\begin{aligned} P_{SC}' &= P_{SC}, \\ \Delta P_{\Sigma*} &= \Delta P_{\min*}. \end{aligned} \quad (3.89)$$

Трифазна чотирипровідна СЕ при  $R_n = R_s$ . При переході до чотирипровідної СЕ та врахуванні коефіцієнта  $k_s$ , виникають додаткові втрати, зумовлені струмом, що протікає в нульовому провіднику. Співвідношення для розрахування поправного коефіцієнта можна записати так :

$$k = \frac{\Delta P_{\Sigma*}' - \Delta P_{n*}'}{\Delta P_{\min*} \cdot (1 + Q_{RMS*}'^2 + P_{pulsRMS*}'^2)} \cdot \frac{P_{SC}'}{P_{SC}}, \quad (3.90)$$

де  $\Delta P_{\Sigma*}'$ ,  $\Delta P_{n*}'$  – відносні сумарна потужність втрат і потужність втрат у нульовому проводі в новій СЕ (у разі врахування коефіцієнта  $k_s$ ) відповідно.



Для чотирипровідної СЕ

$$P_{SC} = \frac{1}{T \cdot R_s} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} \left( u_{sa}^2 + u_{sb}^2 + u_{sc}^2 - \frac{5}{16} \cdot (u_{sa} + u_{sa} + u_{sa})^2 \right) dt. \quad (3.91)$$

Після інтегрування (3.91) в періоді повторюваності з урахуванням (3.77) отримаємо

$$P_{SC} = \frac{U_m^2}{32R_s} \cdot (11k_a^2 + 11k_b^2 + 11k_c^2 + 5k_a k_b + 5k_b k_c + 5k_c k_a). \quad (3.92)$$

Припустивши, що

$$\Delta P_{\Sigma}^{\prime} - \Delta P_{n^*}^{\prime} \approx \Delta P_{\min}^* \quad (3.93)$$

і врахувавши відношення (3.86), отримаємо спрощену формулу для розрахування сумарних втрат:

$$\Delta P_{\Sigma}^* \cong \Delta P_{\min}^* \cdot \frac{P_{SC}^{\prime}}{P_{SC}} - \Delta P_{n^*}^*. \quad (3.94)$$

Спрощену формулу (3.94) можна використати як для трипровідних СЕ, так і для чотирипровідних СЕ.

Беручи до уваги (3.85) і (3.92) для трифазної чотирипровідної СЕ при  $R_n = R_s$ ,

$$\Delta P_{\Sigma}^* \cong \frac{48P_{\min}^*}{11k_a^2 + 11k_b^2 + 11k_c^2 + 5k_a k_b + 5k_b k_c + 5k_c k_a} - \Delta P_{n^*}^*. \quad (3.95)$$

Результати розрахунку за отриманими уточненими співвідношеннями і результати комп'ютерного моделювання співставлено в підрозділі 5.3.4.

Розрахування за уточненими співвідношеннями уможливило поширення універсальної формули (для визначення сумарної потужності втрат через її складові) на більшість режимів роботи СЕ, у яких виникають додаткові втрати, обумовлені трьома причинами – наявністю в СЕ реактивної потужності, наявністю пульсацій у кривій миттєвої активної потужності й протіканням струму в нульовому проводі.

У трифазній СЕ з асиметричним джерелом і симетричним навантаженням потужність сумарних втрат пропорційна добутку потужності мінімально можливих втрат і відношенню потужності резистивного КЗ до внесення асиметрії на потужність резистивного КЗ після внесення асиметрії в систему. Потужність сумарних втрат при асиметричному джерелі незначно залежить від додаткових складових втрат, обумовлених реактивною потужністю і пульсаціями миттєвої активної потужності.

Отримані співвідношення забезпечують достатньо точне розрахування сумарної потужності втрат, але використовувати їх на практиці, наприклад під час автоматизованого розрахування у вимірювальній системі, ускладнено. Отже, подальший розвиток положень сучасних теорій миттєвих активної і реактивної потужностей має обумовлюватися використанням просторових перетворень координат для визначення складових сумарної потужності. Зазначений підхід дасть змогу отримати точне розрахункове співвідношення, яке можна застосовувати на практиці.

### **3.4 Складові сумарної потужності втрат у просторових $pqr$ -координатах**

#### **3.4.1 Складові сумарної потужності втрат у просторових $pqr$ -координатах при симетричних синусоїдальних напругах джерела**

Як було доведено в підрозділі 3.3, розрахування за уточненим співвідношенням (3.74) дає змогу мінімізувати відносну похибку визначення сумарної потужності втрат трифазних чотирипровідних СЕ, але незручне під час практичної реалізації.

Результати, отримані в підрозділі 3.3, ґрунтуються на положеннях сучасних теорій миттєвої активної й реактивної потужностей, тому логічним напрямом продовження дослідження є подання запропонованих складових потужності втрат на підставі використання однієї з таких теорій. Найбільші можливості для виокремлення складових миттєвої потужності втрат і складових, що потребують компенсації, у трифазних чотирипровідних системах має  $p$ - $q$ - $r$  теорія миттєвої активної й реактивної потужностей [113]. Математичний апарат  $p$ - $q$ - $r$  теорії докладно описаний в підрозділі 2.1, він обумовлюється просторовим переходом із декартової  $abc$ -системи координат в  $pqr$ -систему. Перетворення систем координат здійснюється в два етапи: узагальнені просторові вектори напруги у струму з  $abc$ -системи координат за допомогою матриці прямого перетворення Кларк переносяться в нерухому просторову  $\alpha\beta 0$ -систему відповідно до (2.3), (2.10).

Після цього відбувається перехід із нерухомої системи координат  $\alpha\beta 0$  у обертову координатну систему  $pqr$ :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} u_0 & u_\alpha & u_\beta \\ 0 & -\frac{u_{\alpha\beta 0} u_\beta}{u_{\alpha\beta}} & \frac{u_{\alpha\beta 0} u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} \\ u_{\alpha\beta} & -\frac{u_0 u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} & -\frac{u_0 u_\beta}{u_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (3.96)$$

де

$$u_{\alpha\beta 0} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2}, \quad (3.97)$$

$$u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}. \quad (3.98)$$

У симетричному режимі роботи трифазного джерела чотирьохпроводної СЕ система  $pqr$  дає змогу виокремити чотири складових миттєвої потужності:

$$\begin{bmatrix} P_{AV} + p_{puls} \\ q_q \\ q_r \end{bmatrix} = u_p \cdot \begin{bmatrix} i_{p-} + i_{p\sim} \\ i_r \\ i_q \end{bmatrix}, \quad (3.99)$$

де

$$u_p = u_{\alpha\beta 0} = |\vec{u}_s| = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2} = \sqrt{u_a^2 + u_b^2 + u_c^2} = const - \quad (3.100)$$

модуль просторового вектора напруги, який в  $pqr$ -координатах збігається за напрямом з віссю  $p$ ;  $P_{AV}$  і  $p_{puls}$  – постійна, що обчислюється в періоді повторюваності, і змінна складові миттєвої активної потужності СЕ;  $i_{p-}$  і  $i_{p\sim}$  – постійна і змінна складові проекції узагальненого просторового вектора струму на вісь  $p$   $pqr$  системи координат відповідно;  $q_q$  і  $q_r$  – миттєві реактивні потужності за осями  $r$  і  $q$  відповідно.

Передавання електричної енергії від джерела до навантаження з мінімально можливими втратами обумовлює постійну складову миттєвої активної потужності, інші три складові мають підлягають компенсації. Виключення з системи змінної складової миттєвої активної потужності уможливить компенсування амплітудної асиметрії мережевих струмів. Виключення з системи реактивної потужності за віссю  $q$  дасть змогу компенсувати струм нульового проводу. Виключення з системи реактивної потужності за віссю  $r$  забезпечить компенсування кута зсуву фаз між відповідними фазними напругами й струмами.

Виразимо додаткові складові потужності втрат у  $pqr$ -координатах. Сумарну потужність втрат у трифазній чотирипровідній СЕ за еквівалентною схемою (рис. 2.4) можна подати за допомогою складників:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_s + \Delta p_n = i_s^2 \cdot R_s + i_n^2 \cdot R_n, \quad (3.101)$$

де  $\Delta p_s$  і  $\Delta p_n$  – миттєва потужність втрат у трифазній лінії і миттєва потужність втрат в нульовому проводі відповідно;

$$i_s^2 = \begin{bmatrix} i_a^2 & i_b^2 & i_c^2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} i_p^2 & i_q^2 & i_r^2 \end{bmatrix}^T - \quad (3.102)$$

квадрат модуля мережевого струму;  $i_n^2$  – квадрат миттєвого значення струму нульового проводу, що обчислюється за (3.72).

Розглянемо випадок, коли активний опір нульового проводу дорівнює опору лінійного проводу, тобто

$$R_n = R_s. \quad (3.103)$$

У симетричному режимі роботи джерела струм нульового проводу в системі  $pqr$  можна виразити відповідно до (3.96) через проекцію результуючого вектора струму на вісь  $r$  із огляду на те, що вісь  $r$  обертової системи координат  $pqr$  нерухома й за напрямом збігається з віссю 0 координатної системи  $\alpha\beta 0$ :

$$i_n = \sqrt{3} \cdot i_r. \quad (3.104)$$

Підставивши (3.102) – (3.104), (3.72) в (3.101), отримаємо:

$$\Delta p_{\Sigma} = R_s \cdot (i_p^2 + i_q^2 + 4 \cdot i_r^2). \quad (3.105)$$

Виразивши проекції струмів у системі  $pqr$  через відповідні потужності в (3.99) і перейшовши до відносних одиниць, запишемо співвідношення для визначення миттєвої відносної (в долях активної корисної потужності) сумарної потужності втрат у  $pqr$ -координатах при симетричних синусоїдальних напругах джерела:

$$\Delta p_{\Sigma*} = \frac{1}{k_{sc}} \cdot (p_*^2 + q_{r*}^2 + 4 \cdot q_{q*}^2) \Big|_{P_{usf} = const}; \quad (3.106)$$

для відносного середнього, обчисленого в періоді повторюваності,

$$\Delta P_{\Sigma*} = \frac{1}{k_{sc}} \cdot (P_{RMS*}^2 + Q_{rRMS*}^2 + 4 \cdot Q_{qRMS*}^2) \Big|_{P_{usf} = const}, \quad (3.107)$$

де  $P_{RMS*}$ ,  $Q_{rRMS*}$ ,  $Q_{qRMS*}$  – відносні (у частках середньої корисної потужності) середньоквадратичні значення складових потужності за осями  $p$ ,  $q$ ,  $r$  відповідної координатної системи.

Таким чином, відносну сумарну потужність втрат в rqr-системі координат можна подати, як суму трьох складових, що відповідають потужностям втрат за кожною координатною віссю:

$$\Delta P_{\Sigma*} = \Delta P_{p*} + \Delta P_{q*} + \Delta P_{r*} \Big|_{P_{usf} = const}. \quad (3.108)$$

Порівняємо співвідношення (3.107) з отриманим раніше співвідношенням (3.66). Квадрат середньоквадратичного значення активної потужності за віссю  $p$  rqr-системи координат можна представити двома складовими

$$P_{RMS*}^2 = P_{AV*}^2 + P_{pulsRMS*}^2 = (1 + \Delta P_{\Sigma*})^2 + P_{puls*}^2. \quad (3.109)$$

Коефіцієнт, що виражає відношення потужності резистивного короткого замикання трифазної СЕ до корисної активної потужності, можна визначити за відносною потужністю мінімально можливих втрат:

$$\frac{1}{k_{sc}} = \frac{\Delta P_{\min*}}{(1 + \Delta P_{\min*})^2}. \quad (3.110)$$

Квадрат модуля вектора відносної середньоквадратичної реактивної потужності –

$$Q_{RMS*}^2 = Q_{qRMS*}^2 + Q_{rRMS*}^2. \quad (3.111)$$

Відносна середня потужність втрат у нульовому проводі –

$$\Delta P_{n*} = \frac{3 \cdot Q_{qRMS*}^2}{k_{sc}}. \quad (3.112)$$

Підставивши (3.109) – (3.112) в (3.107) і обчисливши корені квадратного рівняння, можна записати співвідношення для розрахування відносної сумарної потужності втрат за прийнятими раніше енергетичними складовими

$$\Delta P_{\Sigma*} = \frac{1 + \Delta P_{\min*}^2 - \sqrt{(1 - \Delta P_{\min*}^2)^2 - 4 \cdot \Delta P_{\min*} \times \frac{\times (\Delta P_{puls*} + \Delta P_{q*} + \Delta P_{n*} \cdot (1 + \Delta P_{\min*})^2)}{2 \cdot \Delta P_{\min*}}}}{2 \cdot \Delta P_{\min*}} \Big|_{P_{usf} = const}. \quad (3.113)$$

Точне розрахункове співвідношення (3.113) з незначною похибкою можна замінити спрощеним співвідношенням

$$\Delta P_{\Sigma*} = \Delta P_{\min*} + \Delta P_{puls*} + \Delta P_{q*} + \Delta P_{n*} \cdot (1 + \Delta P_{\min*})^2 \Big|_{P_{usf} = const}. \quad (3.114)$$

Порівнявши (3.114) із запропонованим раніше співвідношенням (3.67), виразимо додаткову п'яту складову, обумовлену взаємним впливом електромагнітних процесів в лініях і нульовому проводі:

$$\Delta P_{mut*} = \Delta P_{n*} \cdot (\Delta P_{min*}^2 + 2 \cdot \Delta P_{min*}). \quad (3.115)$$

Запишемо співвідношення, що виражають складові потужності додаткових втрат універсального рівняння, за відповідними складовими в координатах  $pqr$ :

$$\Delta P_{Q*} = (1 + \Delta P_{min*})^2 \cdot \left( \Delta P_{r*} + \frac{\Delta P_{q*}}{4} \right), \quad (3.116)$$

$$\Delta P_{puls*} = (1 + \Delta P_{min*})^2 \cdot \Delta P_{p*} - \Delta P_{min*} \cdot (1 + \Delta P_{p*} + \Delta P_{q*} + \Delta P_{r*})^2, \quad (4.117)$$

$$\Delta P_{n*} = \frac{3}{4} \cdot \Delta P_{q*}, \quad (4.118)$$

$$\Delta P_{mut*} = \frac{3}{4} \cdot (\Delta P_{min*}^2 + 2 \cdot \Delta P_{min*}) \cdot \Delta P_{q*}. \quad (4.119)$$

Співвідношення (4.116) – (4.119) можна подати у вигляді матриці переходу від системи складових потужності в  $pqr$ -координатах до системи енергетичних складових потужності:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{Q*} \\ \Delta P_{puls*} + \Delta P_{min*}(1 + \Delta P_{\Sigma*}) \\ \Delta P_{n*} \\ \Delta P_{mut*} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} 0 & (1 + \Delta P_{min*})^2 & 4(1 + \Delta P_{min*})^2 \\ 4(1 + \Delta P_{min*})^2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 3(\Delta P_{min*}^2 + 2\Delta P_{min*}) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{p*} \\ \Delta P_{q*} \\ \Delta P_{r*} \end{bmatrix}. \quad (3.120)$$

Складові потужності додаткових втрат (за універсальним співвідношенням (3.66) і в координатному поданні (3.120)) обумовлюються значенням потужності мінімально можливих втрат, яке, зі свого боку, є функцією активного опору лінії. Із огляду на те, що вимірювання активного опору лінії в реальному часі ускладнено, виразимо потужність мінімально можливих втрат через миттєві значення струмів і напруг, вимірюваних згідно з рисунком 2.4.

Підставивши співвідношення (3.120) в (3.107) і виконавши перетворення, отримаємо формулу для розрахування відносної потужності мінімально можливих втрат

$$\Delta P_{\min}^* = \frac{P_{pqr}^* - 2 \cdot \Delta P_{\Sigma}^* - \sqrt{P_{pqr}^2 - 4 \cdot \Delta P_{\Sigma}^* \cdot P_{pqr}^*}}{2 \cdot \Delta P_{\Sigma}^*}, \quad (3.121)$$

де

$$P_{pqr}^* = P_{RMS}^2 + Q_{RMS}^2 + 4 \cdot Q_{RMS}^2. \quad (3.122)$$

Відносну потужність сумарних втрат можна визначити миттєвими значеннями струмів і напруг, вимірюваними відповідно до рисунка 2.4, або проекціями на вісь  $p$  узагальнених просторових векторів струмів і напруг в  $pqr$ -системі координат:

$$\Delta P_{\Sigma}^* = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} ((i_{pL} + i_{pc}) \cdot u_{ps} - i_{pL} \cdot u_{pL}) dt, \quad (3.123)$$

де  $i_{pL}$ ,  $i_{pc}$  – проекції на вісь  $p$   $pqr$ -системи координат узагальнених просторових векторів струму навантаження й струму компенсатора відповідно;  $u_{ps}$ ,  $u_{pL}$  – проекції на вісь  $p$   $pqr$ -системи координат узагальнених просторових векторів мережевої напруги й напруги на клемі підімкнення навантаження відповідно.

За допомогою положень  $p$ - $q$ - $r$  теорії миттєвих активної й реактивної потужностей, а також співвідношень (3.116) – (3.123) сумарну потужність втрат в СЕ можна розкласти на окремі складові, що описуються універсальним розрахунковим співвідношенням (3.66). Щоб застосувати запропоновану методику, достатньо інформації про миттєві значення струмів і напруг, що вимірюються в СЕ при використанні САФ.

У підрозділі 5.3.5 шляхом моделювання в Matlab-моделі трифазної СЕ подано результати розрахування складових сумарної потужності втрат у двох системах – енергетичній системі складових і системі складових у  $pqr$ -координатах. Визначено також резерв підвищення ККД у разі підімкнення САФ для п'яти режимів роботи трифазної СЕ.

### 3.4.2 Складові сумарної потужності втрат у просторових $pqr$ -координатах при несиметричних напругах джерела

Недоліком  $p$ - $q$ - $r$  теорії потужності при визначенні миттєвих активної й реактивної потужностей є прив'язка до просторового вектора напруги, що спрямовується за віссю  $p$  при розрахуванні просторового вектора струму. При симетричних синусоїдальних напругах трифазного джерела

зазначене явище не спостерігається, оскільки просторовий вектор напруги завжди спрямований за координатною віссю  $p$ , а його модуль незмінний. Складнощі виникають у трифазних системах електропостачання з несиметричними напругами, які за формою можуть відрізнятися від синусоїдальних. Одним із розв'язків цієї проблеми може бути використання часткового послаблення нульової послідовності узагальненого вектора напруги [71]. Із огляду на це співвідношення для визначення складових сумарної потужності можна подати в  $pqr$ -координатах:

$$\Delta P_{p*} = \frac{U_{p0}^2}{T \cdot k_{sc} \cdot P_{usf}^2} \int_t^{t+T} i_p^2 \cdot (1 + k_p) dt - \quad (3.124)$$

відносна потужність втрат за віссю  $p$ ;

$$\Delta P_{q*} = \frac{U_{p0}^2}{T \cdot k_{sc} \cdot P_{usf}^2} \int_t^{t+T} i_r^2 \cdot (1 + k_q) dt - \quad (3.125)$$

відносна потужність втрат за віссю  $q$ ;

$$\Delta P_{r*} = \frac{U_{p0}^2}{T \cdot k_{sc} \cdot P_{usf}^2} \int_t^{t+T} (i_q^2 + i_p \cdot i_r \cdot k_{pq}) dt - \quad (3.126)$$

відносна потужність втрат за віссю  $r$ ,

$$\text{де} \quad k_p = \frac{3 \cdot k_n \cdot u_0^2}{u_{\alpha\beta 0}^2}, \quad (3.127)$$

$$k_q = \frac{3 \cdot k_n \cdot u_{\alpha\beta}^2}{u_{\alpha\beta 0}^2}, \quad (3.128)$$

$$k_{pq} = \frac{6 \cdot k_n \cdot u_0 \cdot u_{\alpha\beta}}{u_{\alpha\beta 0}^2}, \quad (3.129)$$

$$U_{p0} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} (u_{\alpha\beta 0}^2 - \sigma_0 \cdot u_0^2) dt} - \quad (3.130)$$

діюче значення модуля узагальненого вектора напруги після часткового послаблення складової нульової послідовності,

$$\sigma_0 = \frac{3 \cdot R_n}{R_s + 3 \cdot R_n} - \quad (3.131)$$

коефіцієнт оптимального послаблення складової нульової послідовності, отриманий в [71];

$$k_n = \frac{R_n}{R_s} = \frac{\sigma_0}{3 - 3 \cdot \sigma_0}. \quad (3.132)$$



Коефіцієнт  $k_n$  береться до уваги тільки в разі наявності нульового проводу, в інших випадках він дорівнює нулю.

Складові потужності втрат, що розглядалися під час попереднього етапу дослідження, можна виразити через відповідні складові за осями координатної системи  $pqr$ :

$$\Delta P_{Q^*} = (1 + \Delta P_{\min^*})^2 \cdot \left( \Delta P_{r^*} - \Delta P_{pq^*} + \frac{\Delta P_{q^*}}{1 + K_q} \right), \quad (3.133)$$

$$\Delta P_{puls^*} = (1 + \Delta P_{\min^*})^2 \cdot \frac{\Delta P_{p^*}}{1 + K_p} - \Delta P_{\min^*} (1 + \Delta P_{p^*} + \Delta P_{q^*} + \Delta P_{r^*})^2, \quad (3.134)$$

$$\Delta P_{n^*} = \frac{K_q}{1 + K_q} \cdot \Delta P_{q^*} + \frac{K_p}{1 + K_p} \cdot \Delta P_{p^*} + \Delta P_{pq^*}, \quad (3.135)$$

$$\Delta P_{mut^*} = \Delta P_{n^*} \cdot (\Delta P_{\min^*}^2 + 2 \cdot \Delta P_{\min^*}), \quad (3.136)$$

$$\Delta P_{pq^*} = \frac{U_{p0}^2}{T \cdot k_{sc} \cdot P_{usf}^2} \int_t^{t+T} i_p \cdot i_r \cdot k_{pq} dt, \quad (3.137)$$

де  $K_p$ ,  $K_q$  – середні, обчислені в періоді повторюваності, значення коефіцієнтів (3.127), (3.128).

Складові потужності втрат за осями координат  $p$ ,  $q$ ,  $r$  можна виразити за прийнятою системою енергетичних складових:

$$\Delta P_{p^*} = \Delta P_* \cdot (1 + K_p), \quad (3.138)$$

$$\Delta P_{q^*} = (\Delta P_{n^*} - \Delta P_{pq^*} - \Delta P_* \cdot K_p) \cdot \left( \frac{1}{K_q} + 1 \right), \quad (3.139)$$

$$\Delta P_{r^*} = \frac{\Delta P_{Q^*}}{(1 + \Delta P_{\min^*})^2} + \Delta P_{pq^*} + \Delta P_{mut^*} - (\Delta P_{n^*} - \Delta P_{pq^*} - \Delta P_* \cdot K_p) \cdot \frac{1}{K_q}, \quad (3.140)$$

де

$$\Delta P_* = \frac{\Delta P_{p^*}}{(1 + K_p)} = \frac{\Delta P_{puls^*} + \Delta P_{\min^*} (1 + \Delta P_{\Sigma^*})^2}{(1 + \Delta P_{\min^*})^2}. \quad (3.141)$$

Одержані співвідношення можна перевірити підсумувавши (3.138) – (3.140) і врахувавши (3.141). Після здійснення перетворень і визначення коренів квадратного рівняння одержимо співвідношення, аналогічне до (3.113). Отже, отримані співвідношення коректні.

### 3.4.3 Поширення результатів на наявні методи розрахування складових потужності втрат

Використання координатних перетворень р-q-г теорії потужності дало змогу перейти від однієї системи складових потужності втрат до іншої системи. У зв'язку з цим виникло питання щодо можливості подібного переходу до іншої системи складових потужності втрат.

Аналіз цього питання в літературних джерелах довів, що розрахування складових потужності втрат під час аналізу трифазних СЕ зазвичай обумовлювався елементами системи електропостачання – втратами в трансформаторі, кабелях, елементах електричних машин, захисних і комутаційних апаратах тощо.

Багато уваги подібним питанням у своїх дослідженнях приділяли такі вчені, як І. В. Жежеленко, Ю. С. Железко та інші [18–20]. У роботах Ю. С. Железко розроблено метод визначення потужності втрат у несиметричних режимах трифазної СЕ за коефіцієнтами несиметрії струмів зворотної та нульової послідовностей. Метод симетричних складових, використовуваний для аналізу несиметричних режимів роботи трифазних СЕ, дає змогу виокремити три складові потужності втрат для кожної послідовності [20]:

$$\Delta P_{\Sigma*} = \Delta P_{1*} \cdot \left(1 + k_{2I}^2 + k_{0I}^2 \cdot (1 + 3 \cdot k_n)\right), \quad (3.142)$$

де 
$$k_{2I} = \frac{I_2}{I_1} - \quad (3.143)$$

модуль коефіцієнта несиметрії за зворотною послідовністю;

$$k_{0I} = \frac{I_0}{I_1} - \quad (3.144)$$

модуль коефіцієнта несиметрії за нульовою послідовністю;

$$\Delta P_{1*} = \frac{\Delta P_1}{P_{usf}} = \Delta P_{1a*} + \Delta P_{1p} = \frac{3I_{1a}^2}{P_{usf}} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{1cp}) - \quad (3.145)$$

відносна потужність втрат прямої послідовності;

$I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_0$  – діючі значення струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей відповідно;  $\Delta P_{1a*}$ ,  $\Delta P_{1p*}$  – ортогональні складові потужності втрат прямої послідовності;  $\operatorname{tg} \varphi_{1cp}$  – коефіцієнт реактивної потужності.

Аналіз співвідношень (3.108) і (3.142) дає змогу виразити коефіцієнти останнього за складовими потужності втрат в  $pqr$ -координатах:

$$\Delta P_{1*} = \sqrt{\Delta P_{\min*} \cdot \Delta P_{p*}}, \quad (3.146)$$

$$k_{2I} = \sqrt{\frac{\Delta P_{r*} + \Delta P_{p*}}{\sqrt{\Delta P_{\min*} \cdot \Delta P_{p*}}}} - 1, \quad (3.147)$$

$$k_{0I} = \sqrt{\frac{\Delta P_{q*}}{\sqrt{\Delta P_{\min*} \cdot \Delta P_{p*}} \cdot (1 + 3k_n)}}. \quad (3.148)$$

### 3.5 Висновки за розділом 3

1. Електромагнітні процеси в трифазних СЕ з синусоїдальними симетричними напругами джерела адекватно описуються просторовими векторами напруг і струмів у нерухомій системі координат  $abc$  або в одній з обертових просторових систем координат, наприклад  $pqr$ . Перехід з однієї системи координат в іншу здійснюється за допомогою матриці прямих і зворотних перетворень координат. Однофазну СЕ варто розглядати, як окремий випадок трифазної за нескінченно великих опорів у двох фазах навантаження.

2. Миттєва швидкість передачі енергії елементами СЕ дорівнює миттєвій активній потужності, що визначається, як скалярний добуток просторових векторів напруги та струму. Середня швидкість передачі енергії за певний проміжок часу, наприклад за період повторюваності процесів, визначається, як інтеграл від миттєвої активної потужності в заданому інтервалі часу.

3. Вектор миттєвої реактивної потужності визначається, як векторний добуток просторового вектора напруги й просторового вектора струму. Вектор миттєвої реактивної потужності є розрахунковою величиною, він не визначає значення або швидкості обміну енергією між джерелом і навантаженням. Миттєва реактивна потужність дорівнює модулю вектора миттєвої реактивної потужності. Середнє й середньоквадратичне значення реактивної потужності обчислюються шляхом інтегрування в періоді повторюваності кривої миттєвої реактивної потужності.

4. Запропоновано визначення терміна «реактивна потужність», що обумовлюється положеннями сучасної теорії миттєвих активної й реактивної потужностей, а саме: реактивна потужність – це розрахункова

величина, що визначає швидкість обміну енергією між фазами навантаження або між навантаженням і джерелом без впливу на передачу основного потоку енергії, відношення квадрата середньоквадратичного значення якої до квадрата корисної потужності, помножене на величину мінімально можливої потужності втрат, дорівнює одній зі складових потужності додаткових втрат у СЕ.

5. Трифазні симетричні лінійні реактивні навантаження, такі як трифазні блоки реакторів або трифазні блоки конденсаторів, у разі підімкнення до трифазного джерела симетричних синусоїдальних напруг, не обмінюються з цим джерелом енергією, оскільки сумарна енергія трьох реакторів або трьох конденсаторів залишається незмінною, а миттєва активна потужність джерела дорівнює нулю у всьому інтервалі повторюваності. Обмін енергією між реактивним навантаженням і мережею виникає у разі асиметрії реактивного навантаження.

6. ККД системи електропостачання, у якій інтервали часу з передачею енергії від джерела до навантаження чергуються з інтервалами часу зі зворотним потоком енергії, різко зменшується у разі збільшення коефіцієнта повернення енергії. Ефект зменшення ККД істотно послаблюється, якщо паралельно до навантаження підімкнути накопичувач енергії.

7. Сформульовано припущення, що дають змогу запропонувати універсальну розрахункову формулу (4.67) для визначення сумарної потужності втрат у трифазній СЕ, як суми чотирьох складових, що обумовлюють фізичний зміст електромагнітних процесів в СЕ, а саме: мінімально можливої потужності втрат у СЕ; потужності втрат, пропорційної до квадрата середньоквадратичного значення реактивної потужності; потужності втрат, пропорційної до квадрата середньоквадратичного значення змінної складової активної потужності; потужності втрат у нульовому проводі чотирипровідної СЕ. Результати перевірки формули на створеній Matlab-моделі засвідчили її високу точність ( $\delta_{\max} = 0,5 \%$ ) для трифазних трипровідних СЕ з симетричним джерелом синусоїдальних напруг. Відносна похибка розрахування за наближеною формулою в деяких режимах роботи трифазної чотирипровідної СЕ, наприклад при нелінійному асиметричному навантаженні, може становити – 9 %.

8. Уточнено співвідношення з додатковою п'ятою складовою, що враховує взаємний вплив електромагнітних процесів у лінійних проводах і нульовому проводі.

9. Обґрунтовано концепцію подання складових сумарної потужності втрат у трифазних СЕ, яка базується на використанні р-q-г теорії миттєвих активної й реактивної потужностей. Згідно із цією концепцією, сумарну потужність втрат можна подати у вигляді суми трьох складових –  $\Delta P_{p*}$ ,  $\Delta P_{q*}$ ,  $\Delta P_{r*}$ , що визначаються проекціями узагальнених просторових векторів струму й напруги на осі  $pqr$  системи координат.

10. За допомогою просторових перетворень координат р-q-г теорії миттєвої активної й реактивної потужностей отримано точне розрахункове співвідношення, що враховує чотири складові потужності сумарних втрат: потужність мінімально можливих втрат; потужність додаткових втрат, обумовлених миттєвою реактивною потужністю; потужність додаткових втрат, обумовлених пульсаціями миттєвої активної потужності; потужність додаткових втрат, обумовлених протіканням струму в нульовому проводі. Співставлення точного розрахункового співвідношення із запропонованою раніше універсальною формулою уможливило визначення п'ятої складової потужності додаткових втрат, обумовленої взаємним впливом електромагнітних процесів у лініях трифазної СЕ й нульовому проводі.

11. Визначено спосіб розрахування додаткових складових сумарної потужності втрат, який базується на використанні вимірювальної інформації про значення миттєвих струмів і напруг у СЕ з САФ. Доведено, що використання зазначеного способу забезпечить підстави для розроблення вимірювального приладу, який реєструє складові потужності втрат у певний момент часу, сфера застосування якого може обумовлюватися розробленням алгоритмів управління режимами роботи СЕ з мінімальними втратами електроенергії, а також визначення місця й обґрунтування доцільності встановлення САФ.

12. Запропоновано методику визначення резерву підвищення ККД СЕ під час використання САФ, що дає змогу обґрунтувати економічну ефективність його встановлення.

13. Коефіцієнти несиметрії за зворотною і нульовою послідовностями й складові сумарної потужності втрат, виражені в  $pqr$ -координатах, пров'язані між собою аналітичними співвідношеннями. Подання складових потужності втрат в  $pqr$ -координатах уможливорює перехід до будь-якої іншої системи складових потужності втрат.

14. На підставі аналізу трьох систем складових сумарної потужності втрат доведено можливість переходу від однієї системи складових до іншої. Отримано розрахункові співвідношення, що уможливають здійснення зазначених переходів.

## **РОЗДІЛ 4 ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ І ЕНЕРГОЄМНИМИ НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

Однією з базових характеристик Smart Grid SE є наявність двоспрямованого енергетичного потоку, що формується шляхом поєднання генеруючих можливостей промислової мережі, розподілених альтернативних джерел та накопичувачів енергії. Наявність частки енергії, що споживається безпосередньо близько від місця виробництва, призводить до зменшення загальних втрат на її транспортування і розподілення. Роль накопичувачів енергії для SE з двоспрямованим енергетичним потоком дуже важлива. З одного боку, з'являється можливість накопичувати надлишки енергії, що генерується розподіленими джерелами або є складником рекупераційних потоків, які спостерігаються в технологічних циклах на виробництві або транспорті. З іншого боку, вирішується проблема реалізації маневрової потужності для вирівнювання графіка споживання й узгодження роботи споживачів і генераторів, підімкнених до SE.

Як було доведено в третьому розділі енергетичну ефективність SE можна оцінити шляхом використання двох простих визначальних понять – «потік енергії» і «втрати енергії». Значення коефіцієнта повернення енергії можна охарактеризувати рекупераційною складовою, збереженою у HE.

У цьому розділі розглядаються випадки застосування методу визначення енергоефективності SE з двоспрямованим енергетичним потоком, що як буфер використовують HE. У першій частині розділу за показниками енергоефективності порівнюються п'ять можливих варіантів організації SE рухомого складу метрополітену. У другій частині – розглянуто магістральну Smart Grid з відновлюваними джерелами, накопичувачами енергії й споживачами.

### **4.1 Порівняння систем електропостачання рухомого складу метрополітену за їхньою енергоефективністю**

Метрополітен (далі – МП) є невіддільною частиною транспортної системи сучасного великого міста, що за пасажиропотоком перевищує наземний муніципальний транспорт [84]. Дослідження останніх років

підкреслюють зростаючу роль міського електричного транспорту у формуванні майбутнього вигляду мегаполіса [65]. У зв'язку з цим МП стикається з проблемами забезпечення ефективності електропостачання та збереження надійності пасажирських перевезень в умовах зростаючого трафіку.

Проблема підвищення енергетичної ефективності особливо актуальна для українських МП, де на сьогодні експлуатується рухомий склад із двигунами постійного струму та резистивним гальмуванням, коли кінетична енергія рухомого електропоїзда розсіюється у вигляді тепла в гальмівних резисторах [33; 65]. За даними метрополітену витрати електроенергії на живлення поїздів при такій системі електропостачання становлять 80–95 % загальних витрат електроенергії [65]. До того ж значна частина цієї енергії втрачається на тягових підстанціях, в контактній мережі, у тягових електроприводах і їхніх гальмівних резисторах.

У роботі [37], окрім традиційної (СЕ 1), розглянуто чотири системи електропостачання МП: із активним випрямлячем (АВ) і рекуперацією енергії в мережу (СЕ 2); із АВ і стаціонарним накопичувачем енергії (НЕ) (СЕ 3); із АВ і бортовим накопичувачем енергії (СЕ 4) і безконтактна СЕ з бортовим накопичувачем енергії (СЕ 5) (під цим терміном розуміють відсутність контактної мережі й підімкнення до стаціонарного джерела тільки на станціях). Визначено переваги й недоліки кожної СЕ, однак не сформульовано метод і методику визначення їхньої енергетичної ефективності. У підрозділі розглянуто розроблення методу й методики визначення ефективності систем електропостачання метрополітену. Потрібно зазначити, що результати дослідження можуть бути використані під час оцінювання енергетичної ефективності будь-якої СЕ з напівпровідниковими перетворювачами й накопичувачами енергії.

#### 4.1.1 Миттєва потужність мережі в інтервалі переміщення рухомого складу

Від обраної системи електропостачання МП залежить форма графіка миттєвої потужності, що розвивається електроприводом рухомого складу в повному інтервалі руху. Для зручності подальшого аналізу розділимо повний інтервал руху ( $T$ ) на чотири однакові часові відрізки: час розгону електропоїзда до номінальної швидкості ( $t_{ac}$ ), час руху з номінальною швидкістю (після розгону) ( $t_{mov}$ ), час гальмування ( $t_{br}$ ) і час стояння поїзда на станції ( $t_{st}$ ). На практиці співвідношення зазначених інтервалів можуть істотно відрізнятися від зазначених тут, але методологія розрахування показників енергоефективності від цього не зміниться [49]. На рисунку 4.1

подано графіки струму, напруги й потужності навантаження в інтервалі переміщення рухомого складу між станціями, що відповідають прийнятому раніше припущенню:

$$t_{ac} = t_{mov} = t_{br} = t_{st} = \frac{T}{4}. \quad (4.1)$$

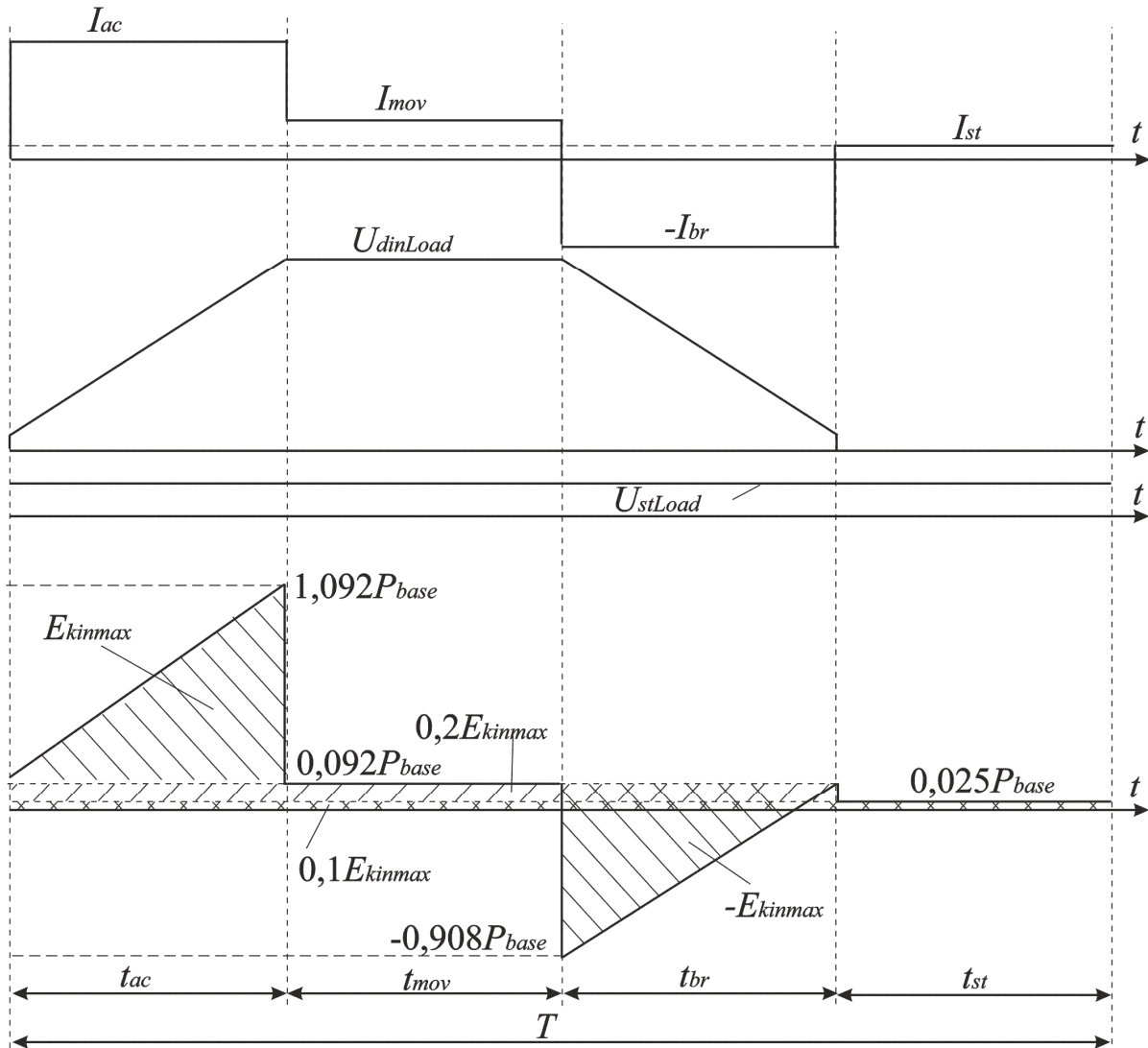


Рисунок 4.1 – Графіки струму, напруги й потужності навантаження в інтервалі переміщення рухомого складу між станціями

Графік потужності навантаження враховує енергію, що споживається на електричну тягу, і енергію, що споживається іншим електротехнічним обладнанням рухомого складу: освітлення, зв'язок, кондиціонування, привід дверей. Для зручності подання графік потужності допоміжного навантаження прийнятий постійним на всіх чотирьох часових інтервалах (див. рис. 4.1). Графіки напруг динамічного та статичного навантажень подані на рисунку 4.1 у вигляді двох окремих залежностей.



Базова потужність  $P_{base}$  на рисунку 4.1 визначається як відношення максимуму кінетичної енергії до інтервалу розгону:

$$P_{base} = \frac{E_{kinmax}}{t_{ac}} = \frac{4 \cdot E_{kinmax}}{T}. \quad (4.2)$$

Під час розгону електропоїзда електричний двигун розвиває номінальний момент на валу і потужність навантаження лінійно зростає до базового значення  $P_{base}$ . Беручи до уваги енергію, споживану на власні потреби ( $E_{tr} = 0,1 \cdot E_{kinmax}$ ) і подолання опору коченню й опору повітря в тунелі ( $E_{move} = 0,2 \cdot E_{kinmax}$ ), максимальна потужність навантаження становить  $P_{max} = 1,092 \cdot P_{base}$ . Після розгону поїзд рухається з постійною швидкістю, а потужність навантаження не змінюється у часі й становить 9,2 % базової потужності (рис. 4.1). В інтервалі гальмування кінетична енергія, набрана поїздом, зменшується до нуля, після чого протягом інтервалу стояння електроживлення забезпечується лише для допоміжного електротехнічного обладнання складу.

На рисунку 4.2 зображено графіки потужності мережі для п'яти обраних систем електропостачання.

Форма графіка потужності традиційної СЕ (рис. 4.2, а) збігається з формою графіка потужності навантаження в інтервалах  $t_{ac}$ ,  $t_{mov}$ ,  $t_{st}$ , беручи до уваги втрати енергії у всіх елементах системи:

$$\Delta E_1 = \Delta E_{S+} + \Delta E_{d+} + \Delta E_{ASD+} = \Delta E_{1+}, \quad (4.3)$$

де  $\Delta E_{S+}$ ,  $\Delta E_{d+}$ ,  $\Delta E_{ASD+}$  – втрати енергії тягової підстанції (у трансформаторах, реакторах, випрямлячі й з'єднувальних кабелях), контактній мережі й елементах електроприводу в разі потоку енергії від мережі до навантаження відповідно.

Графік потужності мережі при СЕ з активним випрямлячем і рекуперацією енергії в мережу (рис. 4.2, б) відповідає графіку потужності навантаження з урахуванням втрат в елементах системи в разі двоспрямованого потоку енергії:

$$\Delta E_2 = \Delta E_{S+} + \Delta E_{d+} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{S-} + \Delta E_{d-} + \Delta E_{ASD-} = \Delta E_{2+} + \Delta E_{2-}, \quad (4.4)$$

де  $\Delta E_{S-}$ ,  $\Delta E_{d-}$ ,  $\Delta E_{ASD-}$  – втрати енергії в пристроях тягової підстанції (трансформаторах, реакторах, випрямлячі й з'єднувальних кабелях), контактній мережі й елементах електроприводу в разі рекуперації енергії з навантаження в мережу відповідно.

Графік потужності мережі при СЕ з АВ і стаціонарним накопичувачем енергії (рис. 4.2, в) відповідає потоку енергії, що

витрачається на власні потреби електропоїзда, подолання тертя й сумарні втрати енергії в елементах СЕ в разі двоспрямованого потоку

$$\Delta E_3 = \Delta E_{S3+} + \Delta E_{d+} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d-} + \Delta E_{ASD-} + \Delta E_{ES} = \Delta E_{3+} + \Delta E_{3-}, \quad (4.5)$$

де  $\Delta E_{S3+}$  – приведені втрати енергії в пристроях тягової підстанції в режимі 3;  $\Delta E_{ES}$  – втрати енергії в накопичувачі енергії.

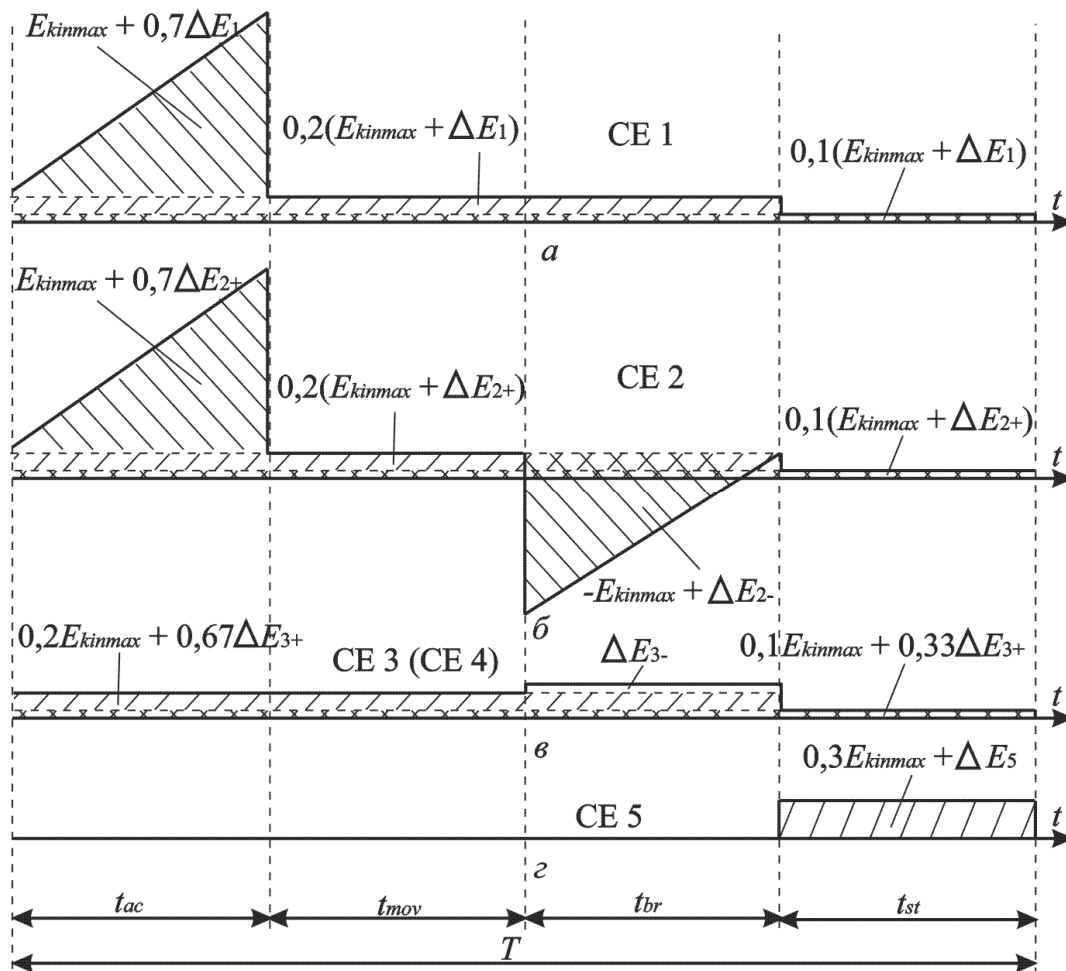


Рисунок 4.2 – Графіки потужності мережі для п'яти систем електропостачання МП

Графік потужності мережі при СЕ з АВ і бортовим накопичувачем енергії аналогічний до графіка потужності СЕ з АВ і стаціонарним накопичувачем енергії (рис. 4.2, в) і відрізняється лише рівнем сумарних втрат енергії в елементах СЕ:

$$\Delta E_4 = \Delta E_{S4+} + \Delta E_{d4+} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{ASD-} + \Delta E_{ES} = \Delta E_{4+} + \Delta E_{4-}, \quad (4.6)$$

де  $\Delta E_{S4+}$ ,  $\Delta E_{d4+}$  – приведені втрати енергії в елементах тягової підстанції та контактній мережі для четвертої СЕ відповідно.

На рисунку 4.2, з подано графік потужності мережі безконтактної СЕ з бортовим накопичувачем енергії. В інтервалі стояння рухомого складу на

станції  $t_{st}$  відбувається підзарядка накопичувача від мережі. Енергія, що закачується в накопичувач на цьому проміжку часу, дорівнює енергії, спожитій на власні потреби, а також на подолання опору повітря й тертя з урахуванням сумарних втрат енергії в елементах системи електропостачання:

$$\Delta E_5 = \Delta E_{S5+} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{ASD-} + \Delta E_{ES5} = \Delta E_{5+} + \Delta E_{5-}, \quad (4.7)$$

де  $\Delta E_{S5+}$  – приведені втрати енергії в пристроях тягової підстанції для п'ятої СЕ;  $\Delta E_{ES5}$  – втрати в бортовому накопичувачі.

#### 4.1.2 Розрахування показників ефективності систем електропостачання

Показники ефективності СЕ зручно визначати, оперуючи поняттям «енергія» [41]. Подальші розрахунки проводяться у відносних одиницях, а за базисну величину приймається максимум кінетичної енергії, набраної поїздом під час розгону:

$$E_{base} = E_{kinmax}. \quad (4.8)$$

Передбачаємо, що на власні потреби рухомого складу витрачається енергія, яка дорівнює 10 % базисної величини, а на подолання тертя й опору повітря в тунелі – 20 %. Тоді корисна енергія

$$E_{usf} = E_{kinmax} + E_{tr} + E_{move}, \quad (4.9)$$

у відносних одиницях –

$$E_{usf*} = E_{kinmax*} + E_{tr*} + E_{move*} = 1 + 0,1 + 0,2 = 1,3. \quad (4.10)$$

Схему потоку енергії через елементи традиційної СЕ подано на рисунку 4.3, а. Схема демонструє односпрямованість потоку енергії від мережі до навантаження. Сумарна енергія, що споживається з мережі при традиційній СЕ, чисельно дорівнює енергії, що пройшла через елементи СЕ в позитивному потоці:

$$E_{S1*} = E_{1+*} = E_{usf*} + \Delta E_{1*}. \quad (4.11)$$

Коефіцієнт корисної дії при закачуванні енергії в навантаження

$$\eta_+ = \frac{E_{usf*}}{E_{1+*}}. \quad (4.12)$$

У схемі з рекуперацією енергії в мережу (рис. 4.3, б) в інтервалі гальмування з'являється зворотний потік енергії від навантаження до джерела, до того ж максимальна кінетична енергія перетворюється на електричну, яка через всі елементи СЕ передається в мережу, зазнаючи втрат. Сумарна енергія мережі в повному інтервалі руху

$$E_{S2*} = E_{move*} + E_{tr*} + \Delta E_{2*} = E_{2+*} - E_{2-*}. \quad (4.13)$$

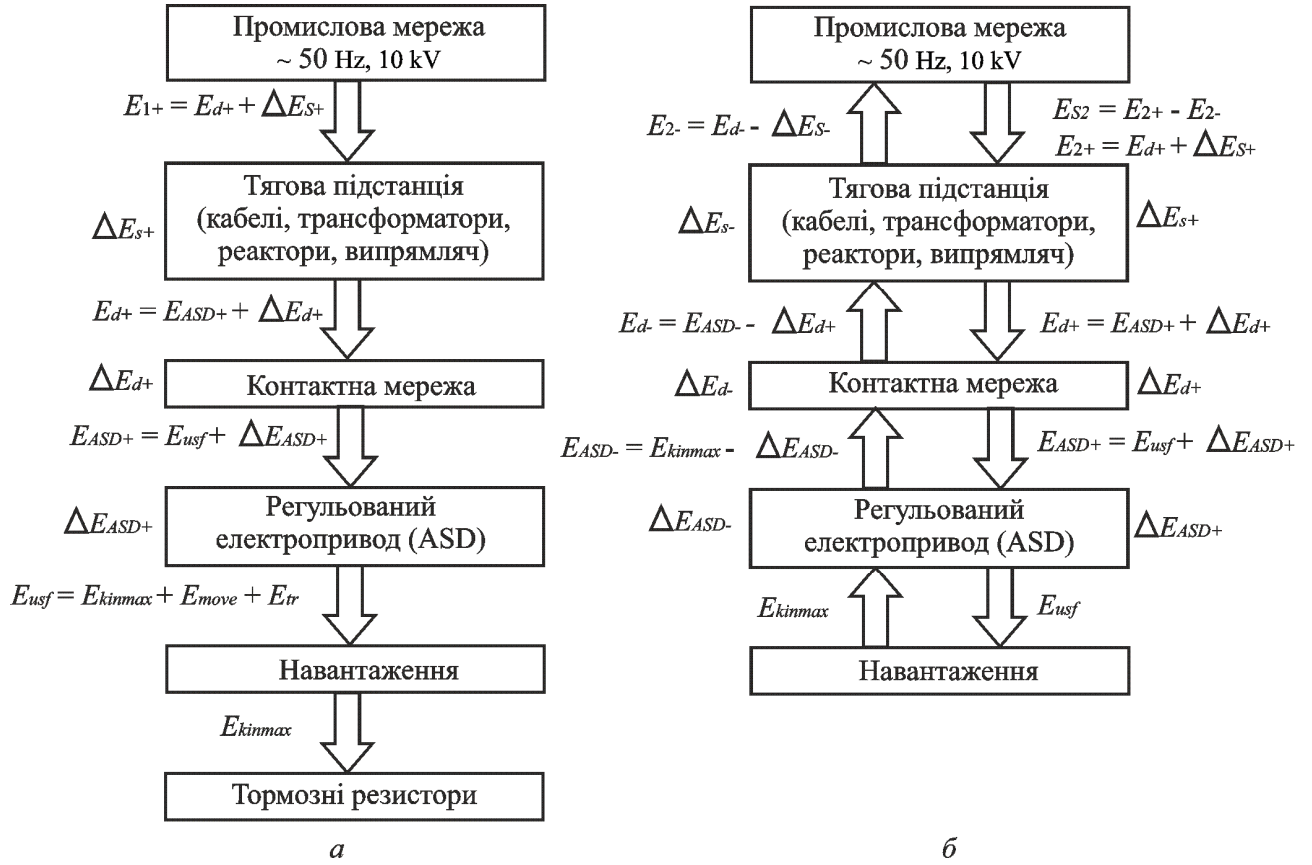


Рисунок 4.3 – Схема потоку енергії через елементи СЕ:  
а – традиційної; б – з рекуперацією енергії

Порівнявши рисунки 4.3, а і 4.3, б робимо висновок, що  $E_{2+*} = E_{1+*}$  і  $\Delta E_{2+*} = \Delta E_{1+*}$ .

При прийнятих вище відносних втратах в елементах СЕ пропорційно обчислюються втрати енергії при її рекуперації (див. рис. 4.3, б):

$$\Delta E_{ASD-*} = \Delta E_{ASD+*} \cdot \frac{E_{kinmax*}}{E_{usf*}}; \quad (4.14)$$

$$E_{ASD-*} = E_{kinmax*} - \Delta E_{ASD-*}, \quad (4.15)$$

де  $E_{ASD-*}$  – відносна енергія, що пройшла через регульований електропривод під час рекуперації;

$$\Delta E_{d-*} = \Delta E_{d+*} \cdot \frac{E_{ASD-*}}{E_{usf*} + \Delta E_{ASD+*}} = \Delta E_{d+*} \cdot \frac{E_{ASD-*}}{E_{ASD+*}}; \quad (4.16)$$

$$E_{d-*} = E_{ASD-*} - \Delta E_{d-*}, \quad (4.17)$$

де  $E_{d-*}$  – відносна енергія, що пройшла через контактну мережу під час рекуперації;

$$\Delta E_{S-*} = \Delta E_{S+*} \cdot \frac{E_{d-*}}{E_{ASD+*} + \Delta E_{d+*}} = \Delta E_{S+*} \cdot \frac{E_{d-*}}{E_{d+*}}; \quad (4.18)$$

$$E_{2-*} = E_{d-*} - \Delta E_{S-*}, \quad (4.19)$$

де  $E_{2-*}$  – відносна енергія, що повертається до мережі (чисельно дорівнює енергії в негативному потоці).

Сумарні втрати енергії при двоспрямованому потоці визначаються, як арифметична сума втрат енергії двох потоків.

ККД при закачуванні енергії в навантаження для другої СЕ розраховується за співвідношенням (4.11). ККД при відборі енергії навантаження

$$\eta_- = \frac{E_{-*}}{E_{kin\max*}}. \quad (4.20)$$

Сумарний ККД, що враховує роботу СЕ в двох режимах,

$$\eta_{\Sigma} = \frac{E_{usf*} - E_{kin\max*}}{E_{+*} - E_{-*}} = \frac{E_{usf*} - E_{kin\max*}}{E_{S*}}, \quad (4.21)$$

де  $E_{S*}$  – відносна енергія, яка споживається з мережі.

Коефіцієнт повернення енергії від навантаження до мережі в загальному випадку

$$k_E = \frac{E_{-*}}{E_{+*}}. \quad (4.22)$$

На рисунку 4.4, а подано умовну схему потоків енергії в СЕ з АВ і стаціонарним накопичувачем.

Позитивний потік енергії за цієї системи електропостачання зменшується порівняно з розглянутими вище СЕ. Зменшення позитивного потоку обумовлено зменшенням втрат енергії в елементах тягової підстанції, оскільки через неї передається тільки енергія власних потреб рухомого складу і енергія  $E_{move}$ :

$$\Delta E_{S3+*} = \Delta E_{S*} \cdot \frac{E_{d+*} - E_{d-*} - \Delta E_{ES*}}{E_{d+*}} = \Delta E_{S*} \cdot \frac{E_{d+*} - E_{3-*}}{E_{d+*}}, \quad (4.23)$$

де  $\Delta E_{ES*}$  – відносні втрати енергії в накопичувачі енергії.

Енергія через елементи СЕ в позитивному потоці –

$$E_{3+*} = E_{d+*} + \Delta E_{S3+*}. \quad (4.24)$$

Енергія, що передається через елементи СЕ зі стаціонарним НЕ в негативному потоці, трохи збільшується внаслідок зменшення втрат у разі її повернення (див. рис. 4.4, а), тому сумарна енергія, споживана з мережі, зменшиться.

Коефіцієнти корисної дії в СЕ зі стаціонарним накопичувачем, а також коефіцієнт повернення енергії, можна розрахувати за співвідношеннями (4.11), (4.19) – (4.21).

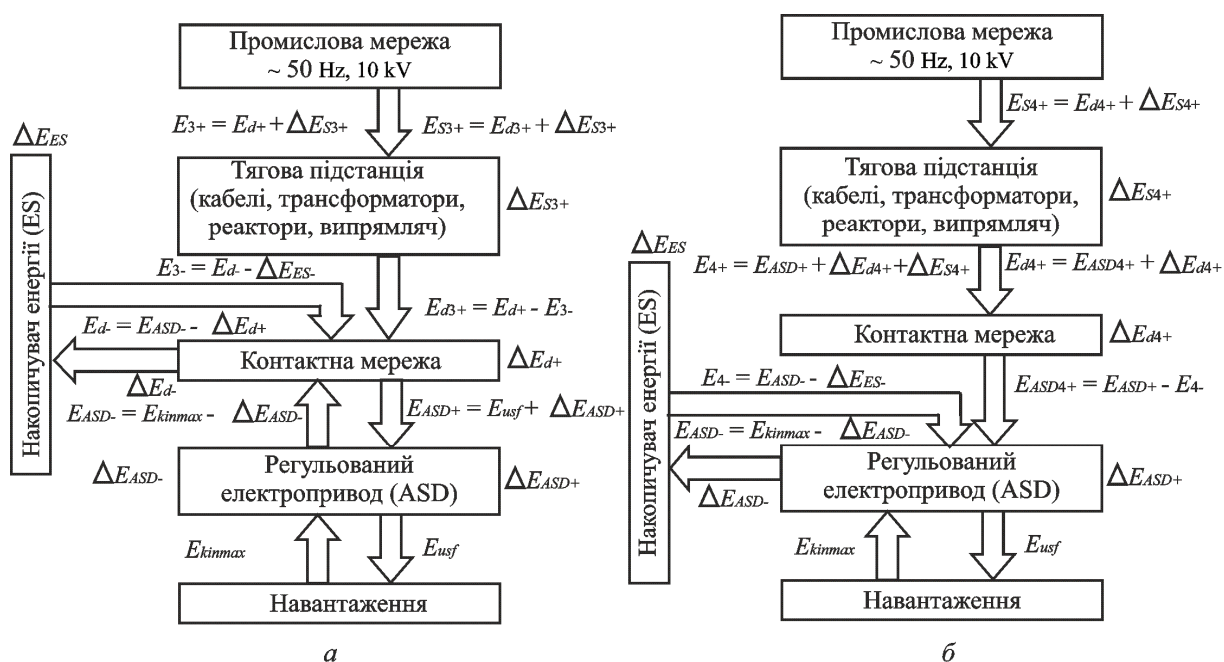


Рисунок 4.4 – Схема потоку енергії через елементи СЕ:  
а – з АВ і стаціонарним НЕ; б – з АВ і бортовим НЕ

Схему потоків енергії в системі електропостачання рухомого складу метрополітену з бортовим накопичувачем енергії подано на рисунку 4.4, б. Зменшення шляху проходження основного потоку енергії в разі розміщення накопичувача на рухомому складі призводить до ще більшого зменшення потоку енергії, споживаної з мережі, однак у разі такої СЕ необхідно враховувати можливе збільшення маси електропоїзда, а отже і максимальної кінетичної енергії:

$$E_{kinmax ES^*} = E_{kinmax^*} + \Delta E_{kinES^*}, \quad (4.25)$$

де  $\Delta E_{kinES^*}$  – приріст кінетичної енергії внаслідок збільшення маси електропоїзда.

Бортове розміщення НЕ уможливорює зменшення втрат енергії в контактній мережі у разі позитивного потоку:

$$\Delta E_{d4+^*} = \Delta E_{d+^*} \cdot \frac{E_{ASD+^*} - E_{ASD-^*} - \Delta E_{ES^*}}{E_{ASD+^*}} = \Delta E_{d+^*} \cdot \frac{E_{ASD+^*} - E_{4-^*}}{E_{ASD+^*}}, \quad (4.26)$$

а також втрат в елементах тягової підстанції:

$$\Delta E_{S4+^*} = \Delta E_{S+^*} \cdot \frac{E_{ASD+^*} + \Delta E_{d4+^*} - E_{4-^*}}{E_{d4+^*}}. \quad (4.27)$$

Енергія через елементи СЕ в позитивному потоці

$$E_{4+*} = E_{ASD+*} + \Delta E_{d4+*} + \Delta E_{S4+*}. \quad (4.28)$$

На рисунку 4.5 зображено схему потоків енергії безконтактної СЕ з бортовим НЕ. Відсутність контактної мережі призводить до зменшення втрат енергії в позитивному потоці порівняно з розглянутими вище системами електропостачання. Тягова підстанція в цій СЕ відіграє роль пристрою підзарядження накопичувача енергії. Втрати енергії в елементах тягової підстанції

$$\Delta E_{S5+*} = \Delta E_{S+*} \cdot \frac{E_{ASD+*} + \Delta E_{ES5*} - E_{ASD-*}}{E_{S1+*}} = \Delta E_{S+*} \cdot \frac{E_{ASD+*} + \Delta E_{ES5*} - E_{5-*}}{E_{S1+*}}, \quad (4.29)$$

де  $\Delta E_{ES5*}$  – відносні втрати енергії в накопичувачі при безконтактній СЕ. Оскільки від накопичувача здійснюється електропостачання рухомого складу в інтервалах руху,

$$\Delta E_{ES5*} > \Delta E_{ES*}. \quad (4.30)$$

Енергія через елементи безконтактної СЕ в позитивному потоці

$$E_{5+*} = E_{ASD+*} + \Delta E_{ES5*} + \Delta E_{S5+*}. \quad (4.31)$$

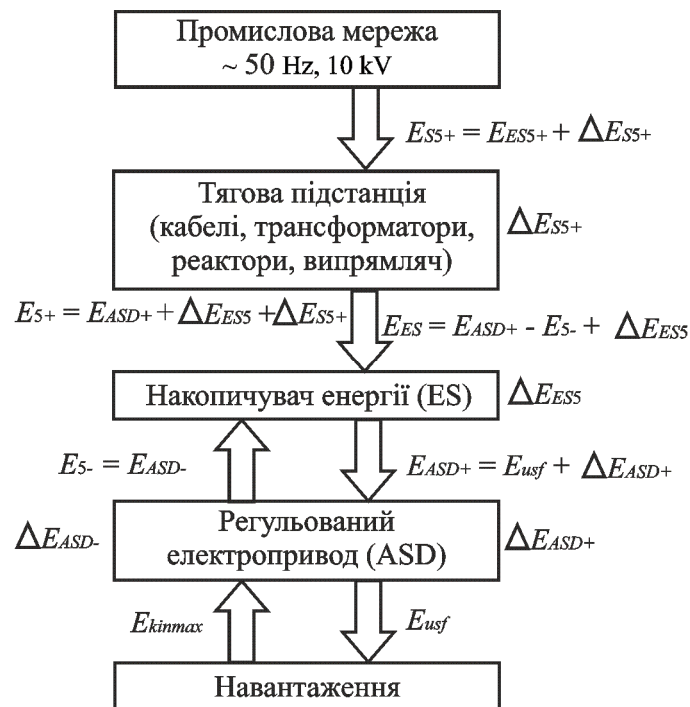


Рисунок 4.5 – Схема потоку енергії через елементи СЕ при безконтактній СЕ

У таблиці 4.1 (в рядках «Р-к») подано результати розрахування показників ефективності п'яти розглянутих систем електропостачання, виконані на підставі співвідношень (4.2) – (4.31). Як вихідні, було обрано

такі дані:  $\Delta E_{S+*} = 0,065$ ,  $\Delta E_{d+*} = 0,13$ ,  $\Delta E_{ASD+*} = 0,07$ ,  $\Delta E_{ES*} = 0,01$ ,  $\Delta E_{ES5*} = 0,02$ . Для бортових систем було розраховано енергетичні показники в разі можливого збільшення максимуму кінетичної енергії на 10 і 20 %.

Таблиця 4.1 – Результати розрахування й експериментальної перевірки показників енергоефективності п'яти систем електропостачання

Номер схеми СЕ		СЕ 1	СЕ 2	СЕ 3	СЕ 4			СЕ 5		
Додаткова кінетична енергія, $\Delta E_{k*}$		–	–	–	0	0,1	0,2	0	0,1	0,2
Сумарна енергія, що споживається з мережі, $E_{S*}$	Р-к	1,565	0,744	0,681	0,496	0,562	0,63	0,462	0,521	0,58
	Е-т	1,565	0,743	0,684	0,496	0,562	0,634	0,462	0,526	0,583
Позитивний потік енергії, $E_{+*}$	Р-к	1,565	1,565	1,527	1,432	1,587	1,744	1,408	1,557	1,706
	Е-т	1,565	1,565	1,528	1,432	1,587	1,744	1,408	1,56	1,711
Негативний потік енергії, $E_{-*}$	Р-к	0	-0,821	-0,846	-0,936	-1,025	-1,114	-0,946	-1,036	-1,126
	Е-т	0	-0,823	-0,844	-0,936	-1,023	-1,111	-0,946	-1,033	-1,12
Втрати енергії в позитивному потоці, $\Delta E_{+*}$	Р-к	0,265	0,265	0,227	0,132	0,157	1,184	0,108	0,127	0,146
	Е-т	0,265	0,265	0,228	0,132	0,157	0,183	0,108	0,13	0,152
Втрати енергії в негативному потоці, $\Delta E_{-*}$	Р-к	1	0,179	0,154	0,064	0,075	0,086	0,054	0,064	0,074
	Е-т	1	0,177	0,156	0,064	0,076	0,089	0,054	0,067	0,079
Сумарні втрати енергії, $\Delta E_{\Sigma*}$	Р-к	1,265	0,444	0,381	0,196	0,232	0,27	0,162	0,191	0,22
	Е-т	1,265	0,442	0,384	0,196	0,233	0,272	0,162	0,196	0,3
ККД під час закачування енергії в навантаження, $\eta_{+}$	Р-к	0,831	0,831	0,851	0,908	0,901	0,894	0,923	0,919	0,914
	Е-т	0,831	0,831	0,851	0,908	0,901	0,893	0,923	0,917	0,91
ККД під час відбору енергії навантаження, $\eta_{-}$	Р-к	0	0,821	0,846	0,936	0,932	0,928	0,946	0,942	0,938
	Е-т	0	0,823	0,844	0,936	0,931	0,925	0,946	0,94	0,933
Сумарний ККД, $\eta_{\Sigma}$	Р-к	0,192	0,403	0,441	0,605	0,587	0,571	0,649	0,634	0,62
	Е-т	0,192	0,404	0,439	0,605	0,585	0,568	0,649	0,629	0,616
Коефіцієнт повернення енергії, $k_E$	Р-к	0	0,524	0,554	0,654	0,646	0,639	0,672	0,666	0,66
	Е-т	0	0,526	0,552	0,654	0,645	0,637	0,672	0,662	0,654

Теоретичні розрахунки підтвердили очікуване збільшення коефіцієнтів корисної дії і коефіцієнта повернення енергії в разі переходу від традиційної СЕ до систем електропостачання, що використовують НЕ.

Енергетична ефективність системи електропостачання рухомого складу збільшується за умови бортового розміщення накопичувача енергії.



Щоб перевірити результати розрахунків було створено Matlab-модель, що дає змогу моделювати п'ять запропонованих СЕ МП і одержати відповідні показники енергетичної ефективності.

#### **4.2 Енергозберігаючий ефект в Smart Grid – системах електропостачання з магістральною схемою підімкнення споживачів**

Перспектива практично реалізувати системи електропостачання на базі концепції Smart Grid з'явилася внаслідок досягнень альтернативної енергетики, прогресу в створенні енергоємних накопичувачів енергії, досягнень силової електроніки, а також розвитку теорії й технології управління складними енергосистемами [1; 5; 57; 77; 81]. За функціональним принципом побудови Smart Grid системи електропостачання (SGESS) відрізняються від традиційних систем, насамперед унаслідок розширення спектру можливостей споживача, на якому будується ідеологія розподіленої енергетики. Споживач стає «активним» учасником енергетичного ринку, з'являється можливість забезпечити двоспрямований потік електроенергії з підімкненням до енергосистеми в будь-який момент часу джерел енергії за принципом «plug and play» [79]. У цьому контексті сам термін «споживач» (consumer) втрачає своє початкове значення, набуваючи значення «активний споживач» (prosumer) [81]. У перспективі концепція Smart Grid (як прообраз енергетичного інтернету) шляхом інтегрування через наявні електромережі має з локальної реалізації перетворитись на енергосистему майбутнього з новими для її учасників умовами взаємодії. Комунікаційна інфраструктура й елементи інтелектуального управління SGESS повинні забезпечити як можливість функціонування в автономному щодо промислової мережі режимі зі споживанням енергії від альтернативних джерел, так і високий рівень якості електроенергії за умови дотримання стабільності й надійності електропостачання.

Ключовими під час впровадження SGESS є три завдання – забезпечити їхню енергетичну надійність, економічну ефективність та екологічну безпечність [81]. Поліпшити економічні показники можна, насамперед, підвищуючи енергоефективність системи електропостачання, одним із ключових показників якої є коефіцієнт корисної дії. У підрозділі розглянуто можливість підвищити ККД магістральної системи електропостачання шляхом впровадження ідеології Smart Grid.

Традиційна магістральна СЕ забезпечує електропостачання декількох розподілених споживачів від промислової електричної мережі синусоїдальної напруги з частотою 50 Гц уздовж протяжної лінії (рис. 4.6, *a*).

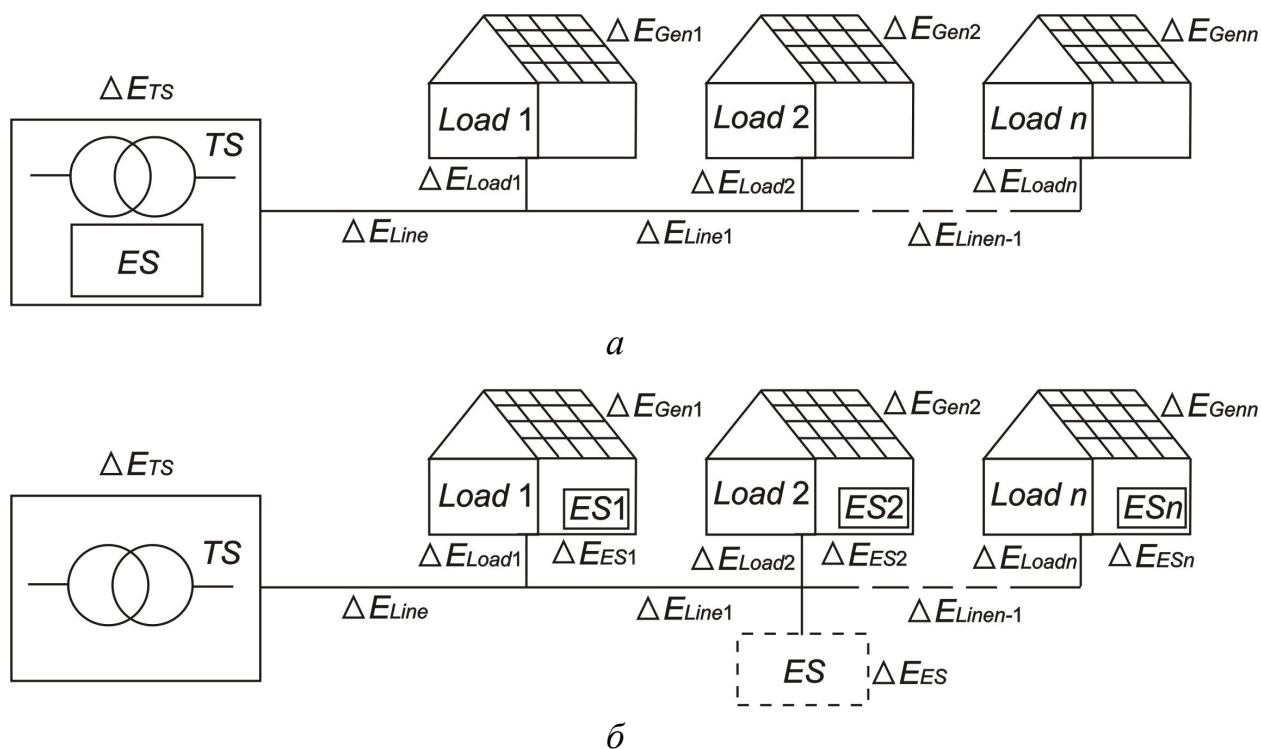


Рисунок 4.6 – Реалізація магістральної Smart Grid CE:

*a* – з розміщенням енергоємного накопичувача на території ТП;

*б* – із розміщенням енергоємного накопичувача поблизу місця споживання

Електропостачання розподілених споживачів забезпечується від трансформаторної підстанції (TS) через магістральну лінію. Магістральна схема здебільшого використовується в установках зовнішнього освітлення, в системах електропостачання промислових підприємств, котеджних селищ і зазвичай є ланкою будь-якої розгалуженої системи електропостачання. Магістральну схему здебільшого вважають прикладом побудови найпростішої Smart Grid (рис. 4.6, *a*). На відміну від традиційного споживача енергії, споживач SGESS є активним, тобто він здатний забезпечити двоспрямований потік енергії в розподіленій мережі. Кожен зі споживачів (рис. 4.6) забезпечений власними генеруючими установками з альтернативними джерелами енергії (сонячні батареї, вітрові турбіни, паливні елементи, дизель-генератори, газові турбіни тощо), здатними за сприятливих умов забезпечити не тільки власні потреби щодо електроенергії, а й акумулювати її надлишок в енергоємних

накопичувачах ( $ES$ ). Використовують два варіанти розміщення накопичувачів: на території трансформаторної підстанції (рис. 4.6, *а*) і поблизу місця споживання (рис. 4.6, *б*). За другого випадку краще використовувати індивідуальні накопичувачі енергії, що входять до складу силового обладнання альтернативних електростанцій активних споживачів. Умовно можна вважати, що електропостачання кожного споживача здійснюється від двох незалежних джерел – промислової мережі й альтернативної електростанції, енергетичні потоки яких контролюються інтелектуальною мікроконтролерною системою.

Частку електроенергії, що виробляється альтернативними джерелами, можна виразити коефіцієнтом генерації

$$k_{Gen} = \frac{E_{Gen}}{E_{usf}}, \quad (4.32)$$

де  $E_{Gen}$  – середня за період повторюваності, наприклад за добу або час реалізації технологічного процесу, енергія, що генерується альтернативними джерелами;  $E_{usf}$  – середня за період повторюваності корисна енергія, що споживається навантаженням.

Залежно від значення коефіцієнта генерації й незалежно від місця розміщення накопичувача енергії можливі чотири режими роботи системи електропостачання (рис.4.6):

$$\begin{aligned} k_{Gen} &= 0, \\ 0 < k_{Gen} &< 1, \\ k_{Gen} &= 1, \\ k_{Gen} &> 1. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Режим  $k_{Gen} = 0$  – це режим роботи традиційної системи електропостачання з односпрямованим потоком енергії від промислової мережі до навантаження (рис. 4.7, *а*). У цьому режимі електропостачання споживачів здійснюється від трансформаторної підстанції через магістральну лінію, потоку енергії від альтернативних джерел не спостерігається. Втрати енергії в цьому режимі складаються із втрат у трансформаторі ( $\Delta E_{TS}$ ), втрат у лінії живлення ( $\Delta E_{Line}$ ), втрат у магістральних ділянках лінії та підвідних проводах ( $\Delta E_{\Sigma Line}$ ), втрат у внутрішній мережі споживачів ( $\Delta E_{\Sigma Load}$ ) (див. рис. 4.6, *а*):

$$\Delta E_1 = \Delta E_{TS} + \Delta E_{Line} + \Delta E_{\Sigma Line} + \Delta E_{\Sigma Load}. \quad (4.34)$$



Рисунок 4.7 – Спрямування енергетичних потоків в СЕ: *а* – традиційна СЕ; *б* – часткове електропостачання від альтернативного джерела; *в* – повне електропостачання від альтернативного джерела; *з* – повне електропостачання від альтернативного джерела з передачею надлишку енергії в накопичувач

Якщо припустити, що встановлені потужності споживачів і геометричні розміри ділянок живлячої магістральної лінії однакові, то сумарні втрати цих ділянок будуть визначатися так:

$$\Delta E_{\Sigma Line} = \Delta E_{Linen} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} k^2, \quad (4.35)$$

де  $\Delta E_{Linen}$  – втрати енергії останньої живлячої ділянки магістралі;  $n$  – кількість споживачів.

Втрати енергії у внутрішній мережі споживачів –

$$\Delta E_{\Sigma Load} = \Delta E_{Load} \cdot n, \quad (4.36)$$

де  $\Delta E_{Load}$  – втрати енергії у внутрішній мережі одного споживача.

Коефіцієнт корисної дії системи електропостачання

$$\eta = \frac{E_{usf}}{E_{usf} + \Delta E}. \quad (4.37)$$

Режим  $0 < k_{Gen} < 1$  – це режим часткового електропостачання від альтернативного джерела. Електропостачання навантаження здійснюється від двох джерел – промислової мережі й альтернативних електростанцій споживачів (рис. 4.7, *б*). Надлишку енергії не спостерігається. Втрати енергії в цьому режимі складаються із втрат у трансформаторі, у живлячій магістральній лінії, у накопичувачі ( $\Delta E_{ES}$ ), втрат у разі передачі до навантаження енергії альтернативних електростанцій ( $\Delta E_{Gen}$ ) і втрат енергії у внутрішній мережі споживача:

$$\begin{aligned} \Delta E_2 = & (\Delta E_{TS} + \Delta E_{Line} + \Delta E_{\Sigma Line} + \Delta E_{ES}) \cdot (1 - k_{Gen}) + \\ & + \Delta E_{Gen} \cdot k_{Gen} + \Delta E_{\Sigma Load}. \end{aligned} \quad (4.38)$$

У разі розміщення накопичувача поблизу місця споживання електроенергії втрати в підвідних магістральних ділянках лінії зменшаться:

$$\Delta E_{\Sigma Line} = \Delta E_{Line} \cdot n. \quad (4.39)$$

Режим  $k_{Gen} = 1$  – це режим повного електропостачання споживачів від альтернативних джерел (рис. 4.7, в). Втрати енергії в цьому режимі найменші й визначаються втратами на генерацію й розподіл енергії у внутрішній мережі за співвідношенням (4.38) у разі підстановки  $k_{Gen} = 1$ .

Режим  $k_{Gen} > 1$  – це режим електропостачання споживачів від альтернативних джерел (рис. 4.7, з) з передачею надлишку електроенергії в накопичувач або промислову мережу. Втрати енергії в разі розміщення накопичувача на  $TS$ :

$$\Delta E_{41} = (\Delta E_{Line} + \Delta E_{\Sigma Line} + \Delta E_{ES}) \cdot (k_{Gen} - 1) + \Delta E_{Gen} \cdot k_{Gen} + \Delta E_{\Sigma Load}. \quad (4.40)$$

Втрати енергії при розміщенні накопичувача поблизу місця споживання

$$\Delta E_{42} = (\Delta E_{\Sigma Line} + \Delta E_{ES}) \cdot (k_{Gen} - 1) + \Delta E_{Gen} \cdot k_{Gen} + \Delta E_{\Sigma Load}. \quad (4.41)$$

Аналіз співвідношень (4.38) – (4.41) дає змогу отримати узагальнююче співвідношення для розрахування втрат енергії в магістральних системах електропостачання з альтернативними джерелами й накопичувачами енергії:

$$\begin{aligned} \Delta E = & (\Delta E_{TS} \cdot k_{u1} + \Delta E_{Line} \cdot k_{u2} + \Delta E_{\Sigma Line} + \Delta E_{ES}) \cdot |1 - k_{Gen}| + \\ & + \Delta E_{Gen} \cdot k_{Gen} + \Delta E_{\Sigma Load}, \end{aligned} \quad (4.42)$$

де  $k_{u1}$ ,  $k_{u2}$  – коефіцієнти, що визначають режим роботи системи електропостачання:  $k_{u1} = 1$ ,  $k_{u2} = 1$  – режим 1, 2 або 3;  $k_{u1} = 0$ ,  $k_{u2} = 1$  – режим 4 в разі розміщення накопичувача на ТП;  $k_{u1} = 0$ ,  $k_{u2} = 0$  – режим 4 в разі розміщення накопичувача поблизу місця споживання.

На рисунку 4.8 подано залежності ККД системи електропостачання від коефіцієнта генерації, побудовані на підставі співвідношень (4.32), (4.37) і (4.42) для двох розглянутих варіантів розміщення накопичувачів. Для побудови було прийнято такі числові значення складових втрат енергії в частках корисної енергії навантаження:  $\Delta E_{TS*} = 0,02$ ,  $\Delta E_{Line*} = 0,08$ ,  $\Delta E_{Line*} = 0,005$ ,  $\Delta E_{Load*} = 0,01$ ,  $\Delta E_{ES*} = 0,02$ ,  $\Delta E_{Gen*} = 0,02$ .

Проаналізувавши рисунок 4.8, можна зробити висновок, що зі збільшенням частки енергії, споживаної від власного альтернативного джерела, ККД системи електропостачання збільшується. У разі генерації енергії альтернативним джерелом більше корисної енергії навантаження і передачі надлишку в накопичувач ККД SGESS зміншується, до того ж кут нахилу характеристики в режимі  $k_{Gen} > 1$  менший, ніж у режимі  $0 < k_{Gen} < 1$ .

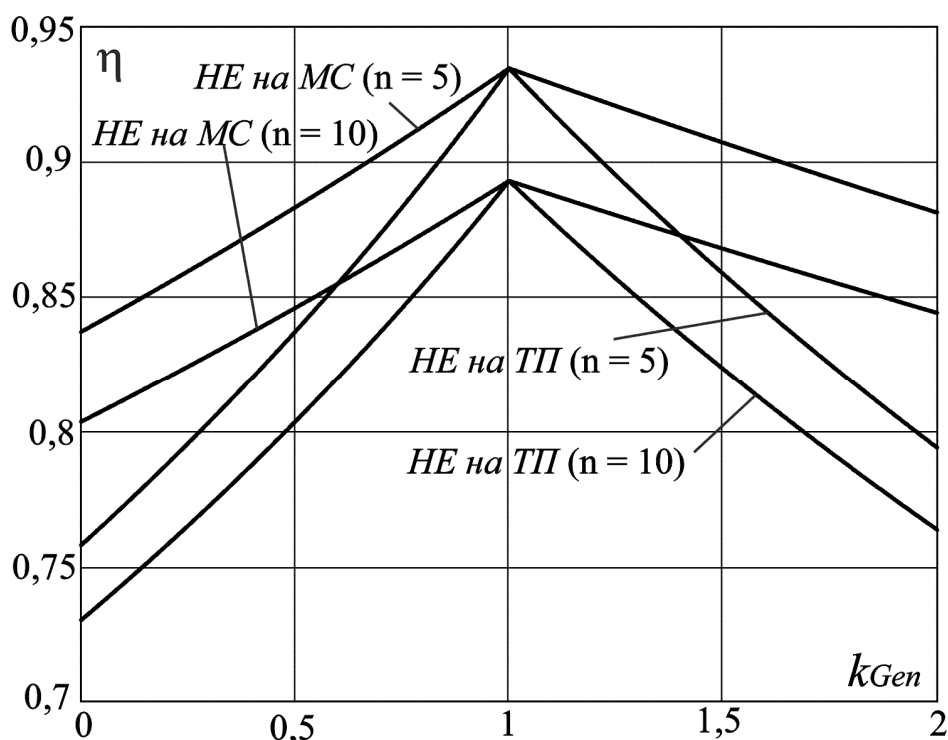


Рисунок 4.8 – Залежності ККД магістральної СЕ від коефіцієнта генерації  $k_{Gen}$  у разі двох способів розміщення НЕ: МС – на місці споживання; ТП – на трансформаторній підстанції

#### Висновки за розділом 4

1. Методом оцінювання показників енергетичної ефективності систем електропостачання рухомого складу метрополітену, що базується на використанні понять потоку і втрат енергії для п'яти різних СЕ МП було розраховано ККД прямого й зворотного потоку, сумарний ККД, а також коефіцієнт повернення енергії.

2. Порівняння п'яти систем електропостачання метрополітену за показниками ефективності (у разі припущення, що тривалість всіх чотирьох часових інтервалів графіка руху електропоїзда однакова) дає змогу зробити такі висновки:

- істотного підвищення ККД можна домогтися шляхом переходу від традиційної СЕ до систем із накопичувачем енергії;

- СЕ з рекуперацією енергії в мережу дає змогу в 2,1 раза скоротити енергію, споживану з мережі. Однак унаслідок двобічності енергетичного потоку сумарні втрати такої СЕ будуть більшими, ніж в інших альтернативних стосовно традиційної системах електропостачання. Крім того, необхідно узгодити графік потужності під час рекуперації з енергетичною компанією;

– під час використання стаціонарного накопичувача енергії, розміщеного на території тягової підстанції, сумарна енергія, споживана з мережі, зменшується в 2,3 рази в разі зменшення сумарних втрат в 3,3 рази. Така СЕ може вважатися найефективнішою під час спорудження нових ліній метрополітену;

– у разі переходу на СЕ з бортовим накопичувачем потік енергії, що споживається з мережі, зменшується в 2,5–3,1 рази, а втрати енергії – в 4,6–6,4 рази. Однак установа на рухомому складі, крім збільшення маси останнього, може спричинити зниження пасажиромісткості; підвищуються вимоги до безпеки перевезення пасажирів при експлуатації накопичувачів значної ємності;

– найкращими показниками енергетичної ефективності різняться безконтактна СЕ. Сумарна енергія, споживана з мережі такої системи електропостачання зменшується в 2,7–3,4 рази, а втрати зменшуються в 5,7–7,8 рази. Однак установа на рухомому складі НЕ значної ємності обумовлюється збільшенням вартості електричної енергії, споживаної електропоїздом, унаслідок обмеження кількості циклів заряду-розряду, необхідності обслуговування і здорожчання самого накопичувача. Упровадження подібних систем електропостачання обумовлюється технологічним прогресом у сфері створення недорогих енергоємних накопичувачів енергії, тому під час проектування певної СЕ рухомого складу метрополітену необхідно ретельно співставити техніко-економічні показники різних інженерних пропозицій із вибором оптимального варіанта.

3. Розроблений метод оцінювання ефективності СЕ рухомого складу метрополітену можна використати для будь-якої системи електропостачання з накопичувачами енергії.

4. Одним із ключових завдань упровадження Smart Grid систем електропостачання є оцінювання енергетичної ефективності прийнятих рішень, що визначає ступінь підвищення ККД системи електропостачання. Запропоновано метод оцінювання ККД системи електропостачання магістрального типу з альтернативними джерелами й енергоємними накопичувачами енергії. Результати розрахування ККД магістральних систем електропостачання з різними параметрами свідчать про те, що перехід від традиційної системи з односпрямованим потоком енергії до локальної – Smart Grid дає змогу домогтися підвищення ККД від 3 до 12 % і більше.

## **РОЗДІЛ 5 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ОТРИМАНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ**

Для дослідження складних перетворювальних систем усе частіше використовуються засоби комп'ютерного моделювання. Можливості сучасних прикладних пакетів настільки широкі, що їх використання фактично стає обов'язковим під час розроблення нових виробів на стадії, що передує виготовленню експериментального зразка. Найвідомішим і найдосконалішим засобом комп'ютерного моделювання електротехнічних, а також напівпровідникових перетворювальних систем є Matlab з його прикладними спеціалізованими бібліотеками Simulink/Simscape/SimPowerSystem. Зручний блоковий інтерфейс Matlab, різноманітні бібліотечні блоки, що з високою точністю моделюють фізичні зразки елементів електротехнічних систем, обумовили популярність цього програмного продукту, особливо під час перевірки теоретичних положень, отриманих у наукових роботах відповідних спеціалістів.

Усі теоретичні результати, розглянуті в попередніх розділах, перевірено на спеціально розроблених комп'ютерних Matlab-моделях. У цьому розділі розглянуто універсальну модель трифазної СЕ з САФ, що дає змогу дослідити роботу СЕ в будь-якому з 288 можливих режимів і розраховувати складові потужності втрат у трьох запропонованих у роботі системах. Також у розділі наведено математичну модель трифазної СЕ, що дає змогу розрахувати корегувальний коефіцієнт, потрібний для підтримання незмінності значення середньої активної потужності навантаження, що є умовою коректного співставлення результатів чисельних експериментів.

### **5.1 Комп'ютерна модель для перевірки енергозберігаючого ефекту від компенсації пульсацій активної та реактивної потужностей і корекції фази струму**

З метою перевірки отриманих у підрозділах 2.3–2.4 теоретичних співвідношень, було розроблено спеціалізовану Matlab-модель системи електропостачання. Модель дає змогу дослідити електромагнітні процеси в системі електропостачання в масштабі реального часу і з високою точністю розрахувати коефіцієнт корисної дії в разі змінювання параметрів



моделі й графіків активної та реактивної потужностей. Схему Matlab-моделі зображено на рисунку 5.1 [46; 48].

Matlab-модель складається з об'єднаних за допомогою ліній зв'язку блоків, які можна розподілити на п'ять груп:

- 1) силова частина (блоки 1–4);
- 2) система управління (блоки 5–7);
- 3) вимірювачі (блоки 8–11);
- 4) вимірювальні прилади (осцилографи й мультиметри) (блоки 12–19);
- 5) блоки підімкнення вимірювальних приладів (блоки 20–25).

Навантаження живиться від трифазної симетричної системи напруг  $U_n = 380$  В (блок 1) через кабельну лінію (блок 2). У цьому блоці встановлюються заздалегідь розраховані значення омічних опорів лінії, що визначають відношення потужності короткого замикання до корисної потужності ( $P_{SC}/P_{usf}$ ).

На відміну від еквівалентної схеми рисунка 2.9 Matlab-модель становить трифазну систему із заданим за допомогою джерел струму графіком миттєвої активної потужності навантаження. Модель дає змогу за заданими параметрами елементів розрахувати фактичні значення ККД. Результати розрахування ККД системи електропостачання з номінальною потужністю 445 кВт у разі накладення двох та трьох пульсацій подано в таблицях 5.1 і 5.2 відповідно. Для завдання необхідної амплітуди й фази струму навантаження за умови незалежного обліку графіків активної й реактивної потужностей використовуються блоки системи управління (блоки 6, 7).

Завдання за активним і реактивним струмами навантаження розраховується за допомогою зворотного зв'язку за відповідними фазними напругами в точці підімкнення, вимірювання яких виконується в блоці 9. Перетворення плоскої нерухомої системи координат АВС до плоскої системи  $\alpha\beta$  під час розрахування завдань за струмами навантаження в блоках 6 і 7 дає змогу досягти необхідної точності й прив'язки до фазних напруг. Схему електропостачання, прийняту під час моделювання, зображено на рисунку 5.2, а узагальнену структурну схему розрахування завдань за активним і реактивним струмами – на рисунку 5.3.

Порівнявши результати таблиць 2.4 і 5.1, а також таблиць 2.5 і 5.2, можна зробити висновок про те, що похибка розрахування ККД за запропонованою в підрозділі 2.3 методикою є неістотною і зменшується зі збільшенням відношення  $P_{SC}/P_{usf}$ .

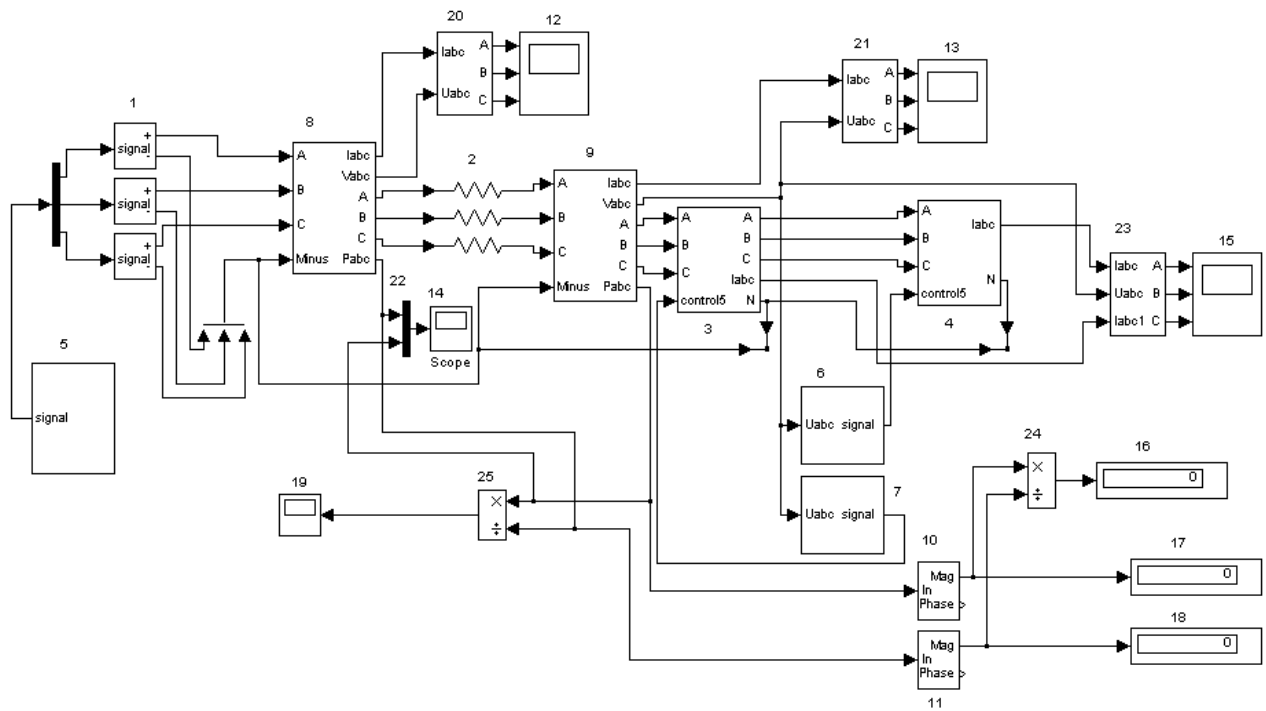


Рисунок 5.1 – Схема Matlab-моделі трифазної системи електропостачання для перевірки енергозберігаючого ефекту

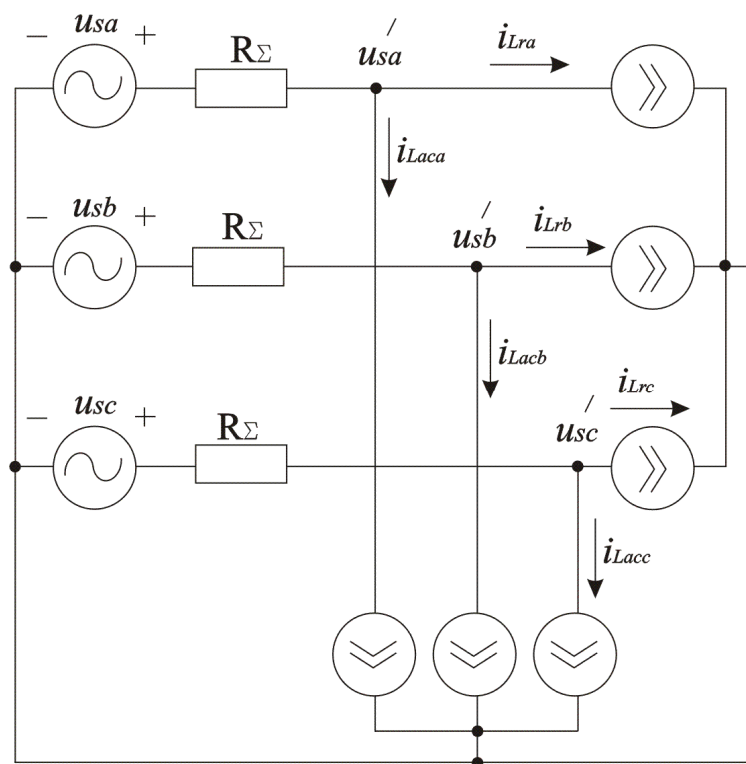


Рисунок 5.2 – Схема електропостачання, прийнята під час моделюванні

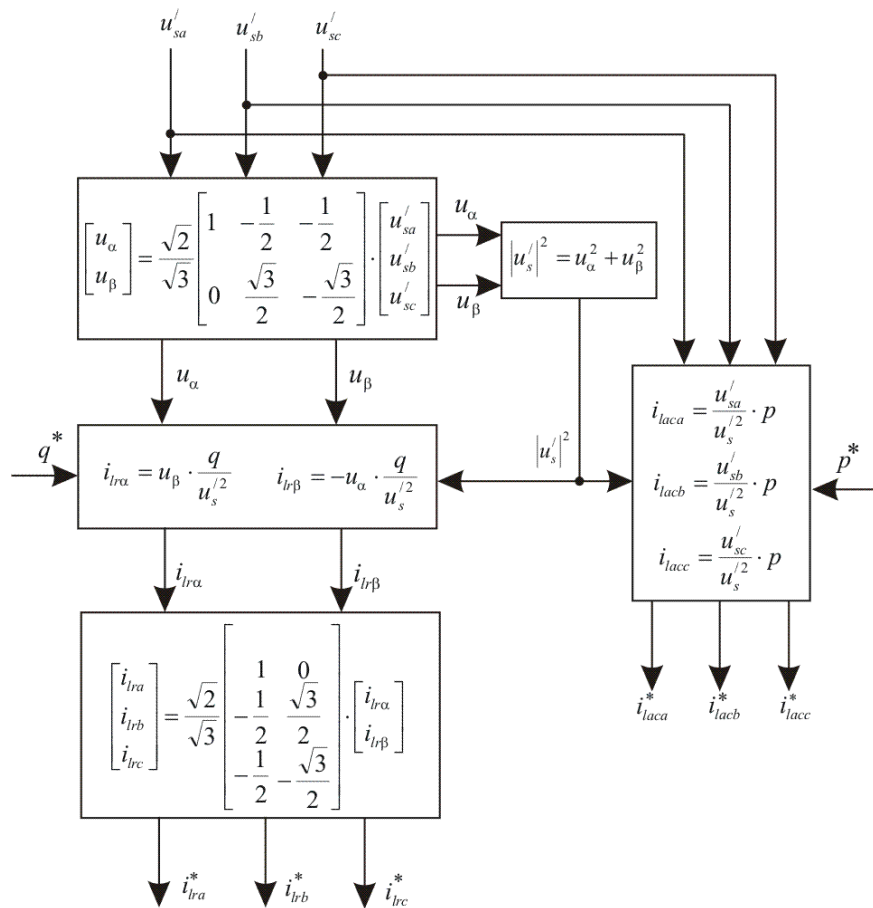


Рисунок 5.3 – Узагальнена структурна схема розрахування завдань стосовно активного й реактивного струмів

Таблиця 5.1 – Розрахування  $\eta = f(\Delta_1, k_{sc})$  у разі накладення двох пульсацій

$\Delta_1$	$k_{sc}$					
	8	10	12	15	20	50
0	0,691	0,8011	0,8455	0,8829	0,9165	0,9689
0,1	0,714	0,8108	0,8524	0,8879	0,9199	0,9701
0,2	0,7254	0,8176	0,8574	0,8915	0,9224	0,971
0,3	0,7313	0,8217	0,8605	0,8938	0,924	0,9716
0,4	0,733	0,8234	0,8618	0,8947	0,9246	0,9718
0,5	0,731	0,8227	0,8613	0,8944	0,9244	0,9717
0,6	0,7254	0,8196	0,8591	0,8928	0,9233	0,9713
0,7	0,7161	0,8142	0,8551	0,8898	0,9213	0,9706
0,8	0,7025	0,8064	0,8493	0,8856	0,9183	0,9696
0,9	0,6831	0,7961	0,8417	0,8801	0,9145	0,9682
1	0,6489	0,7826	0,8322	0,8732	0,9098	0,9666

Таблиця 5.2 – Розрахування  $\eta=f(\Delta_1, k_{sc})$  у разі накладення трьох пульсацій

$\Delta_1$	$k_{sc}$					
	8	10	12	15	20	50
0	0,661	0,7836	0,8325	0,8734	0,9099	0,9666
0,1	0,6785	0,791	0,8378	0,8772	0,9125	0,9675
0,2	0,6859	0,7953	0,841	0,8795	0,9141	0,9681
0,3	0,6888	0,797	0,8423	0,8805	0,9148	0,9683
0,4	0,6881	0,7966	0,842	0,8802	0,9146	0,9682
0,5	0,6851	0,795	0,8408	0,8794	0,914	0,968
0,6	0,683	0,7944	0,8404	0,87910,87	0,9138	0,968
0,7	0,6782	0,7923	0,8389	8	0,9131	0,9677
0,8	0,6702	0,7823	0,8359	0,8759	0,9116	0,9672
0,9	0,6561	0,7811	0,8306	0,872	0,9089	0,9662
1	0,628	0,7703	0,8228	0,8663	0,905	0,9648

У таблицях 2.6–2.8 у колонках «експ.» подано виміряні за допомогою Matlab-моделі значення ККД системи електропостачання для відповідних відношень  $P_{SC}/P_{usf}$ , а у стовпчиках «похиб.» – похибка розрахункового методу визначення ККД. На підставі отриманих даних можна зробити висновок, що розрахунковий метод визначення ККД є наближеним при малих значеннях  $P_{SC}/P_{usf}$  і великих значеннях пульсацій графіків активної і реактивної потужностей системи електропостачання. Зі збільшенням відношення  $P_{SC}/P_{usf}$  похибка розрахункового методу зменшується і при значеннях  $P_{SC}/P_{usf} = 20\text{--}50$  стає незначною. Наявність негативної похибки розрахункового методу свідчить про додаткові резерви підвищення ККД (табл. 2.8).

На рисунку 5.4 наведено залежності ККД від параметрів  $\Delta$  і  $v$  при фіксованих значеннях  $P_{SC}/P_{usf}$ , побудовані за результатами експерименту на Matlab-моделі.

За допомогою Matlab-моделі відповідно до рисунка 5.1 було розраховано відносну середню реактивну потужність  $Q_*$ , відносне діюче значення реактивної потужності  $Q_{d*}$ , а також відносні амплітуди основних гармонік миттєвих активної  $P_{1m*}$  і реактивної потужностей  $Q_{1m*}$  [45].

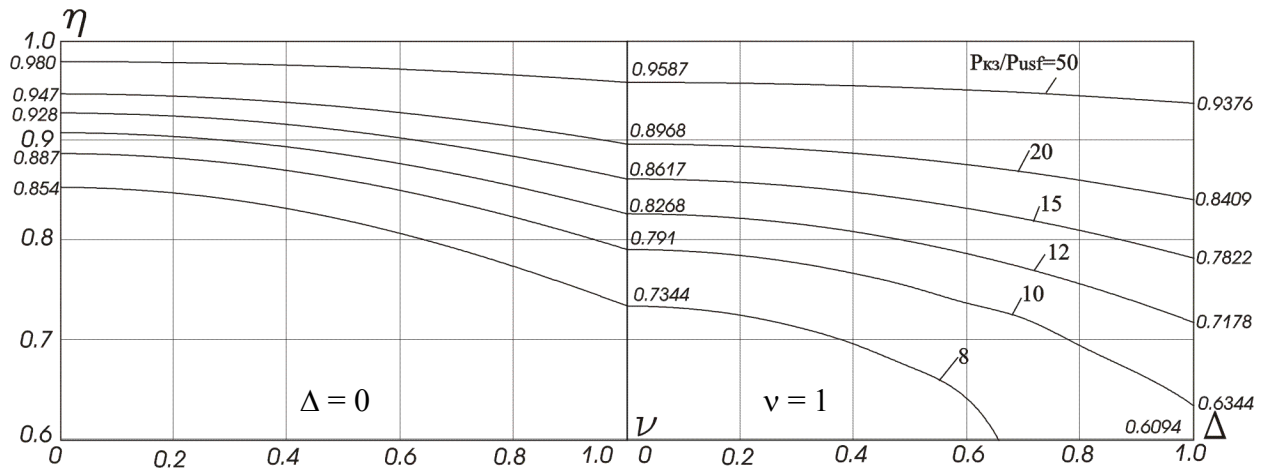


Рисунок 5.4 – Залежності ККД від параметрів  $\Delta$  і  $\nu$  при фіксованих значеннях  $P_{SC}/P_{usf}$

Як базисну величину, було обрано середню активну потужність, що обчислюється в періоді повторюваності і значення якої підтримується незмінним

$$P_{base} = P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p dt = const. \quad (5.1)$$

Розрахування проводився для трьох факторів виникнення миттєвої реактивної потужності: наявність кута зсуву між фазними напругами й струмами, асиметрія резистивного навантаження та наявність гармонік у кривих струмів. Облікувати зазначені фактори можна за умови використання співвідношень (3.28), а також

$$\begin{aligned} i_a &= I_{ma} \cdot \sin(\vartheta + \varphi_a) + \sum_{n_1} \left( \frac{k_1 \cdot I_{ma}}{n_1} \cdot \sin(n_1 \cdot (\vartheta + \varphi_a)) \right) + \sum_{n_2} \left( \frac{k_2 \cdot I_{ma}}{n_2} \cdot \sin(n_2 \cdot (\vartheta + \varphi_a)) \right), \\ i_b &= I_{mb} \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \varphi_b\right) + \sum_{n_1} \left( \frac{k_1 \cdot I_{mb}}{n_1} \cdot \sin\left(n_1 \cdot \left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \varphi_b\right)\right) \right) + \\ &\quad + \sum_{n_2} \left( \frac{k_2 \cdot I_{mb}}{n_2} \cdot \sin\left(n_2 \cdot \left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \varphi_b\right)\right) \right), \\ i_c &= I_{mc} \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} + \varphi_c\right) + \sum_{n_1} \left( \frac{k_1 \cdot I_{mc}}{n_1} \cdot \sin\left(n_1 \cdot \left(\vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} + \varphi_c\right)\right) \right) + \\ &\quad + \sum_{n_2} \left( \frac{k_2 \cdot I_{mc}}{n_2} \cdot \sin\left(n_2 \cdot \left(\vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} + \varphi_c\right)\right) \right); \end{aligned} \quad (5.2)$$

де  $k_1, k_2$  – амплітудні коефіцієнти;  $n_1 = 2, 4, 6, \dots, n_{1n}$ .

У таблиці 5.3 подано результати розрахування зазначених вище величин у разі зменшення ККД системи електропостачання на 1 % від максимального  $\eta_{\max} = 0,947$ , що відповідає  $k_{sc} = 20$ .

Таблиця 5.3 – Розрахування середньої та діючої реактивної потужності в разі зниженні ККД на 1 % від  $\eta_{\max} = 0,947$

$\Phi-p$	$I_{ma}$	$I_{mb}$	$I_{mc}$	$\varphi_a$	$\varphi_b$	$\varphi_c$	$k_1$	$k_2$	$P_{1m*}$	$Q_{1m*}$	$Q^*$	$Q_{d*}$
1	1,0108	1,0108	1,0108	0,518	0	0	0	0	0,178	0,198	0,24	0,278
	1,0162	1,0162	1,0162	0,54	$\pi/36$	0	0	0	0,18	0,204	0,261	0,298
	1,0131	1,0131	1,0131	0,523	0	$\pi/36$	0	0	0,162	0,175	0,264	0,292
	1,0202	1,0202	1,0202	0,545	$\pi/20$	0	0	0	0,179	0,194	0,281	0,313
	1,0154	1,0154	1,0154	0,519	0	$\pi/20$	0	0	0,15	0,149	0,284	0,303
	1,0192	1,0192	1,0192	0,549	$\pi/36$	$\pi/36$	0	0	0,161	0,184	0,286	0,314
	1,0211	1,0211	1,0211	0,545	$\pi/18$	0	0	0	0,179	0,19	0,286	0,316
	1,016	1,016	1,016	0,517	0	$\pi/18$	0	0	0,148	0,143	0,289	0,306
	1,0228	1,0228	1,0228	0,541	$\pi/15$	0	0	0	0,177	0,181	0,296	0,322
	1,0173	1,0173	1,0173	0,51	0	$\pi/15$	0	0	0,143	0,128	0,298	0,312
	1,0249	1,0249	1,0249	0,528	$\pi/12$	0	0	0	0,172	0,163	0,31	0,331
	1,0194	1,0194	1,0194	0,497	0	$\pi/12$	0	0	0,139	0,109	0,31	0,32
	1,0273	1,0273	1,0273	0,559	$\pi/20$	$\pi/20$	0	0	0,141	0,16	0,326	0,345
	1,0294	1,0294	1,0294	0,559	$\pi/18$	$\pi/18$	0	0	0,136	0,152	0,336	0,353
	1,0338	1,0338	1,0338	0,557	$\pi/15$	$\pi/15$	0	0	0,123	0,137	0,356	0,369
	1,0405	1,0405	1,0405	0,545	$\pi/12$	$\pi/12$	0	0	0,101	0,111	0,384	0,392
	1,054	1,054	1,054	0,41	0,41	0,41	0	0	0	0	0,435	0,435
2	1,274	1	0,6255	0	0	0	0	0	0,195	0,078	0,23	0,239
	1,321	0,9	0,679	0	0	0	0	0	0,195	0,082	0,23	0,238
	1,342	0,8	0,758	0	0	0	0	0	0,195	0,099	0,223	0,238
	1,33	0,7	0,87	0	0	0	0	0	0,195	0,087	0,228	0,238
	1,224	0,6	1,076	0	0	0	0	0	0,195	0,089	0,227	0,239
3	0,967	0,967	0,967	0	0	0	0,615	0	0,148	0,037	0,356	0,366
	0,967	0,967	0,967	0	0	0	0	0,561	0,032	0,025	0,247	0,257

На рисунку 5.5 подано залежності діючого значення реактивної потужності  $Q_{d*}$  від зменшення ККД –  $\Delta\eta$  (при  $\eta_{\max} = 0,947$ ) для трьох чинників виникнення миттєвої реактивної потужності: однакового для трьох фаз фазового зсуву між напругою і струмами (крива 1), асиметрії резистивного навантаження (крива 2) і наявності непарних гармонік в кривих струмів (крива 3). Розбіжність трьох кривих свідчить про різну величину реактивної потужності в разі введення одного з трьох факторів і таким чином підтверджує тезу про те, що модуль вектора реактивної

потужності є розрахунковою величиною і не визначає кількісні характеристики енергообміну в СЕ (див. підрозділ 3.1).

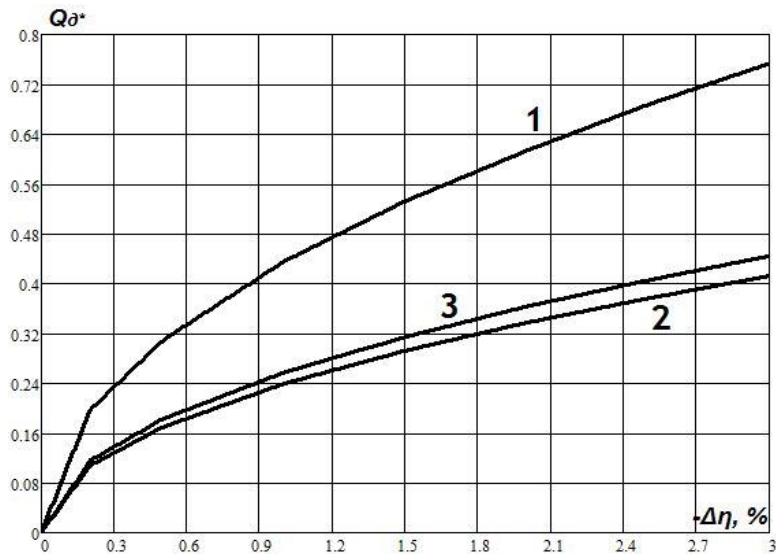


Рисунок 5.5 – Залежність  $Q_{d*} = f(-\Delta\eta)$  при  $\eta_{\max} = 0,947$

## 5.2 Математична модель трифазної системи електропостачання з силовим активним фільтром для оцінювання складових сумарної потужності втрат

Усвідомлення особливостей роботи трифазних систем електропостачання дає змогу фахівцям у сфері силової електроніки вирішувати низку завдань щодо електромагнітної сумісності споживачів електричної енергії і промислової мережі, а також щодо підвищення енергетичної ефективності роботи таких систем. Комплексне розв'язання зазначених завдань у сучасних умовах передбачає застосування засобів активної фільтрації – силових активних фільтрів. У системах електропостачання комунальних споживачів, промислових підприємств, електричного транспорту все частіше застосовуються САФ паралельного типу [94; 128]. Незважаючи на простоту силової схеми, що становить трифазний інвертор напруги на транзисторних модулях, САФ є складними динамічними системами, здатними адаптуватися до змінювання конфігурації та режиму роботи трифазної СЕ. Доцільність використання САФ для зменшення втрат в СЕ [3; 96] обумовлена необхідністю попередньо оцінити сумарну потужність втрат у системі до і після його підімкнення. Найпростішим способом здійснення такого оцінювання є комп'ютерне моделювання трифазного СЕ з САФ. У підрозділі описується спосіб створення такої комп'ютерної моделі, що дає змогу дослідити

різноманітні енергетичні режими роботи трифазного СЕ з мінімальними витратами часу.

Об'єктом для моделювання оберемо еквівалентну схему трифазної СЕ з САФ, зображену на рисунку 2.4 і описану у підрозділі 2.2.

### 5.2.1 Структура моделі трифазної системи електропостачання

Структуру Matlab-моделі трифазної СЕ можна оптимізувати, застосувавши замість схеми поданої на рисунку 2.4, еквівалентну схему зображену на рисунку 5.6.

Трифазне джерело напруги в цій схемі складається з двох послідовно підімкнених джерел – симетричного синусоїдального джерела напруги  $u_{sa}$ ,  $u_{sb}$ ,  $u_{sc}$  і додаткового трифазного джерела напруги  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$ , що підімкнені до СЕ при розмиканні шунтуючого контактора  $SU$ . За допомогою додаткового джерела можна досягти амплітудної або фазної асиметрії, а також додати вищі гармонійні складові до спектра напруги живлення. Трифазне навантаження моделюється двома блоками – трифазним симетричним резистивним навантаженням  $k_l \cdot R_l$  і регульованим трифазним джерелом струму  $j_a$ ,  $j_b$ ,  $j_c$ , підімкненим паралельно до симетричного резистивного навантаження після замикання контактора  $SJ$ . Регульоване джерело струму створює в лінійних проводах необхідну форму струму, яка буде відповідати будь-якому лінійному або нелінійному навантаженню у разі симетричного або несиметричного завантаження фаз. Коефіцієнт пропорційності  $k_l$ , на який множаться активні опори всіх трьох фаз, необхідний для підтримання постійного значення середньої активної корисної потужності навантаження  $P_{usf} = \text{const}$ , як це впливає зі співвідношення (3.74), при внесенні будь-якого збурення в систему, а його визначення є окремим завданням.

Повернімося до еквівалентної схеми СЕ, поданої на рисунку 2.4, при розімкнутому контакторі  $SA$  і замінимо її спрощеною схемою, зображеною на рисунку 5.7, що пояснює причини виникнення складових потужності втрат згідно з (3.74). Електричні величини й параметри в схемі на рисунку 5.7 подано як векторні. Схема складається з джерела напруги, фазні значення якої описуються вектором  $\vec{u} = \vec{k}_u \circ \vec{u}_s + \vec{u}_{ns} \circ \vec{k}_{un} \cdot s_u$ , активного опору лінії  $R_s \cdot \vec{v}$ , комплексного лінійного опору навантаження для  $i$ -тої гармонічної складової струму, що описується вектором  $\vec{z}_{Li} = k_l \cdot R_l \cdot \vec{k}_a + j \cdot (x_{li} \cdot \vec{k}_r + x'_{si} \cdot \vec{v})$ , і джерела струму, що моделює нелінійне навантаження, описуване вектором  $\vec{k}_j \circ \vec{J} \cdot s_j$ .



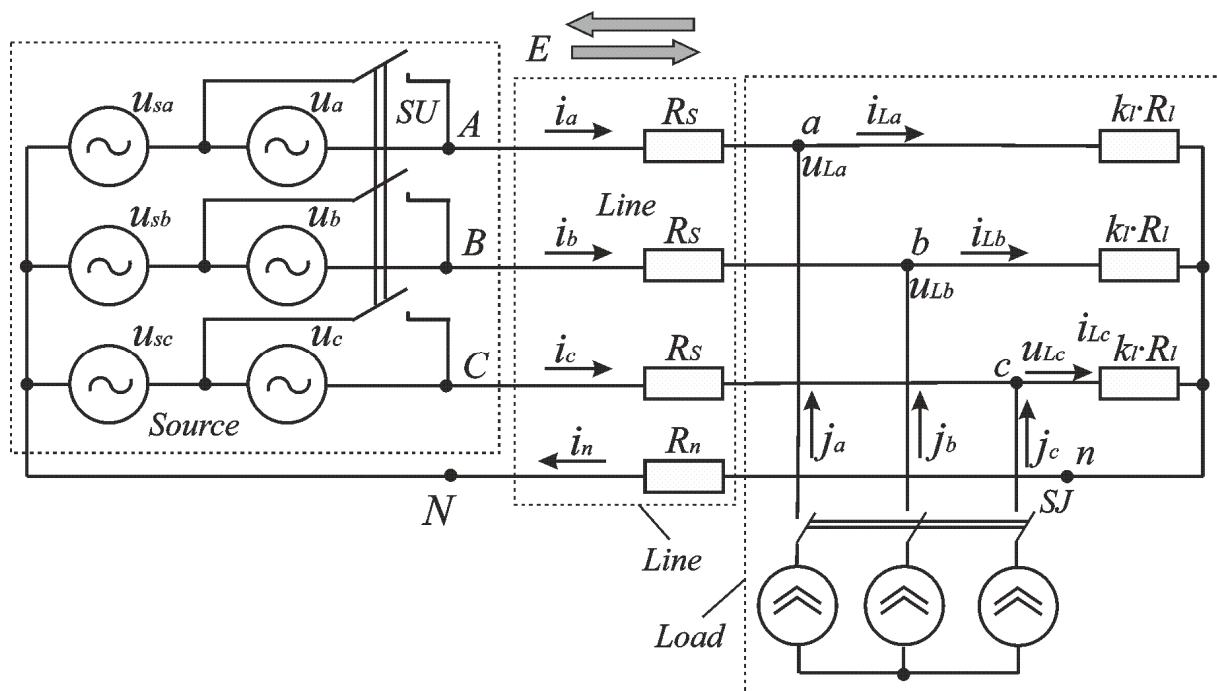


Рисунок 5.6 – Еквівалентна схема трифазного СЕ

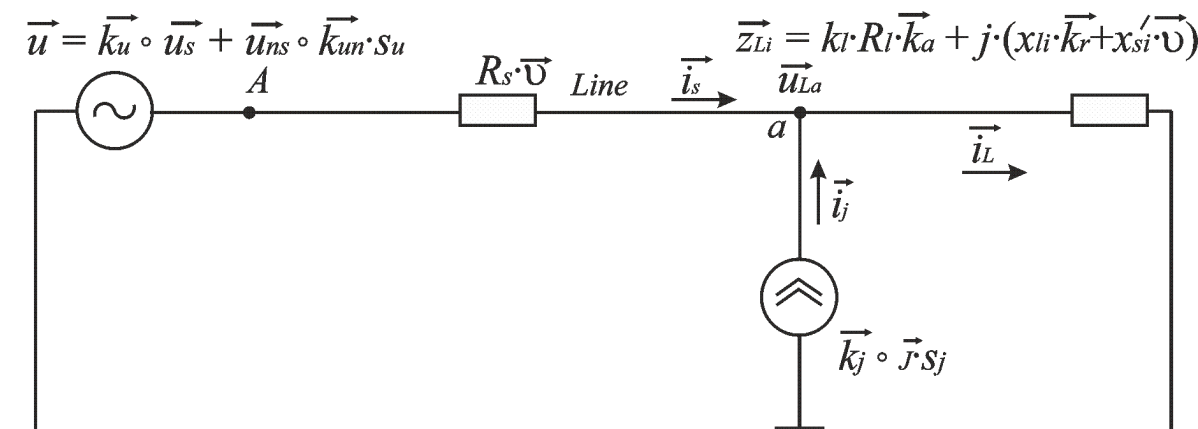


Рисунок 5.7 – Спрощена схема трифазної СЕ для завдання параметрів

На рисунку 5.7 прийнято такі позначення:

– тривимірний комплексний вектор фазних симетричних синусоїдальних напруг

$$\vec{u}_s = \begin{bmatrix} U_s \cdot e^{j \cdot 0} \\ U_s \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}} \\ U_s \cdot e^{-j \cdot \frac{4\pi}{3}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{sa} \\ \underline{U}_{sb} \\ \underline{U}_{sc} \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

де  $U_s$  – діюче значення фазної напруги трифазного симетричного джерела;

– тривимірний комплексний вектор фазної напруги додаткового трифазного несинусоїдального джерела

$$\vec{u}_{ns} = \begin{bmatrix} \sqrt{\sum_{i=2}^n (U_i \cdot e^{j \cdot \Phi_{uai}})^2} \\ \sqrt{\sum_{i=2}^n (U_i \cdot e^{j \cdot \Phi_{ubi}})^2} \\ \sqrt{\sum_{i=2}^n (U_i \cdot e^{j \cdot \Phi_{uci}})^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix}, \quad (5.4)$$

де  $U_i$  – діюче значення  $i$ -тої гармонійної складової фазної напруги трифазного несиметричного джерела;  $n$  – кількість вищих гармонік у спектрі напруги;  $\Phi_{uai}$ ,  $\Phi_{ubi}$ ,  $\Phi_{uci}$  – фази відповідних  $i$ -тих гармонійних складових фазних напруг;  $s_u$  – коефіцієнт, що приймає два значення – 0 або 1 залежно від розташування перемикача  $SU$  (рис. 5.7);  $\circ$  – оператор поелементного множення елементів векторів і матриць (добуток Адамара);

– тривимірний комплексний вектор фазних струмів нелінійного навантаження

$$\vec{J} = \begin{bmatrix} \sqrt{\sum_{i=2}^n (J_i \cdot e^{j \cdot \Phi_{iai}})^2} \\ \sqrt{\sum_{i=2}^n (J_i \cdot e^{j \cdot \Phi_{ibi}})^2} \\ \sqrt{\sum_{i=2}^n (J_i \cdot e^{j \cdot \Phi_{ici}})^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{J}_a \\ \underline{J}_b \\ \underline{J}_c \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

де  $J_i$  – діюче значення  $i$ -тої гармонійної складової фазного струму трифазного нелінійного навантаження;  $\Phi_{iai}$ ,  $\Phi_{ibi}$ ,  $\Phi_{ici}$  – фази відповідних  $i$ -тих гармонійних складових фазних струмів;  $s_j$  – коефіцієнт, що набуває двох значень – 0 або 1 залежно від стану перемикача  $SJ$  (рис. 5.6);

– тривимірний комплексний вектор опорів лінійного навантаження

$$\vec{z}_{Li} = \begin{bmatrix} k_l \cdot R_l \cdot k_{aa} + j \cdot (x_{li} \cdot k_{ra} + x'_{si}) \\ k_l \cdot R_l \cdot k_{ab} + j \cdot (x_{li} \cdot k_{rb} + x'_{si}) \\ k_l \cdot R_l \cdot k_{ac} + j \cdot (x_{li} \cdot k_{rc} + x'_{si}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{Lai} \cdot e^{j \cdot \Phi_{zai}} \\ Z_{Lbi} \cdot e^{j \cdot \Phi_{zbi}} \\ Z_{Lci} \cdot e^{j \cdot \Phi_{zci}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{La} \\ \underline{Z}_{Lb} \\ \underline{Z}_{Lc} \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$

де  $x_{li}$  – реактивний опір для  $i$ -тої гармоніки струму;  $x'_{si}$  – реактивний опір кабельної лінії для  $i$ -тої гармоніки струму, приведений до реактивного опору навантаження;  $Z_{Lai}$ ,  $Z_{Lbi}$ ,  $Z_{Lci}$  – модулі повного комплексного опору фаз лінійного навантаження для  $i$ -тої гармоніки струму;  $\Phi_{za}$ ,  $\Phi_{zb}$ ,  $\Phi_{zc}$  – фази відповідних комплексних опорів;

– трьохелементні вектори, що містять інформацію про коефіцієнти амплітудної несиметрії напруги джерела й струмів нелінійного навантаження, фазної несиметрії активного й реактивного навантаження, а також значення відповідних гармонійних складових у спектрі вхідної напруги й струму нелінійного навантаження:

$$\vec{k}_u = [k_{ua} \quad k_{ub} \quad k_{uc}]^T, \quad (5.7)$$

$$\vec{k}_{un} = [k_{una} \quad k_{unb} \quad k_{unc}]^T, \quad (5.8)$$

$$\vec{k}_j = [k_{ja} \quad k_{jb} \quad k_{jc}]^T, \quad (5.9)$$

$$\vec{k}_a = [k_{aa} \quad k_{ab} \quad k_{ac}]^T, \quad (5.10)$$

$$\vec{k}_r = [k_{ra} \quad k_{rb} \quad k_{rc}]^T; \quad (5.11)$$

– одиничний вектор

$$\vec{v} = [1 \quad 1 \quad 1]^T. \quad (5.12)$$

Завданням значень коефіцієнтів  $s_u, s_j$  і елементів векторів (5.7)–(5.11) можна моделювати будь-який з 279 режимів роботи трифазного СЕ (як зазначено у підрозділі 2.2) і розраховувати складові сумарної потужності втрат. Для узагальнення результатів обчислень приймемо, що значення елементів векторів у (5.7) і (5.10) поєднані загальною закономірністю

$$k_a^2 + k_b^2 + k_c^2 = 3. \quad (5.13)$$

Нехай коефіцієнт при фазі А  $k_a$  залишається незмінним і дорівнює одиниці, тоді

$$\begin{aligned} k_a &= \text{const} = 1, \\ k_b &= \text{var} = 0 \dots \sqrt{2}, \\ k_c &= \sqrt{2 - k_b^2} = \sqrt{2} \dots 0. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Приймемо, що значення елементів векторів у (5.8), (5.9), (5.11) підпорядковується іншій закономірності

$$\begin{aligned} k_b &= \text{var} = 0 \dots \sqrt{2}, \\ k_a &= k_c = k_b. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Закономірності змінювання значень елементів векторів (5.14) і (5.15) будуть використовуватися надалі для узагальнення результатів моделювання різних режимів роботи трифазної СЕ. Зазначимо, що ці коефіцієнти можуть змінюватися за будь-яким довільним законом, а обрані закономірності (5.14), (5.15) найточніше відображають вплив змінювання параметрів трифазної СЕ на сумарні втрати.

### 5.2.2 Виконання умови $P_{usf} = \text{const}$ під час моделювання трифазної системи електропостачання

*Подання моделі у векторній формі.* Змінивши параметри елементів еквівалентної схеми трифазної СЕ, можна змінити значення середньої активної корисної потужності навантаження. Повернутися до її початкового значення, як зазначалося вище, можна, змінивши коефіцієнт  $k_l$ . Отримати аналітичний вираз для визначення  $k_l$  важко, тому для його розрахування доцільно використати засоби програмування. Автоматизоване розрахування коефіцієнта  $k_l$  передбачає складання рівняння корисної потужності навантаження відповідно до рисунка 5.7. Можна записати це рівняння у векторному й матричному вигляді.

Розглянемо перший спосіб. Використаємо принцип суперпозиції. У схемі на рисунку 5.7 залишимо джерело напруги. Задамо вектор провідності трифазної СЕ для  $i$ -тої гармоніки струму:

$$\vec{y}_i = \frac{1}{\vec{z}_{Li} + R_s} \cdot \vec{v}. \quad (5.16)$$

Сумарна провідність трифазної чотирипровідної СЕ для  $i$ -тої гармоніки струму

$$y_{si} = \vec{y}_i \cdot \vec{v} + R_n^{-1}. \quad (5.17)$$

Запишемо співвідношення для напруги зсуву нейтралі для основної гармоніки напруги трифазного джерела

$$\underline{U}_{01} = \vec{y}_1 \cdot y_{s1}^{-1} \cdot (\vec{u}_s \circ \vec{k}_u). \quad (5.18)$$

Вектор часткових струмів, створюваних основною гармонікою напруги трифазного джерела в лінійних проводах СЕ,

$$\vec{i}_{e1} = (\vec{u}_s - \underline{U}_{01} \cdot \vec{v}) \circ \vec{y}_1. \quad (5.19)$$

Якщо в кривій вхідної напруги містяться вищі гармоніки (коефіцієнт  $s_u = 1$ ), то процедуру розрахування вектора часткових струмів у схемі з трифазним джерелом напруги необхідно повторити для кожної гармонійної складової, використовуючи співвідношення (5.6), (5.16)–(5.19). Сумарний вектор часткових струмів в лінійних проводах СЕ, в схемі з трифазним джерелом напруги, в цьому режимі описується співвідношенням

$$\vec{i}_e = \sqrt{(\vec{i}_{e1})^2 + \sum_{i=2}^n (\vec{i}_{ei})^2}, \quad (5.20)$$

де  $\vec{i}_{ei}$  – вектор часткового струму  $i$ -тої гармонійної складової в схемі з трифазним джерелом напруги.

У схемі за рисунком 5.7 залишимо джерело струму, попередньо закоротивши джерело напруги, і визначимо вектор часткового струму лінійного навантаження

$$\vec{i}_{Lj} = \begin{bmatrix} \sqrt{\sum_{i=2}^n \left( J_i \cdot Y_{ai} \cdot R_s \cdot e^{j \cdot (\varphi_{iai} + \varphi_{yai})} \right)^2} \\ \sqrt{\sum_{i=2}^n \left( J_i \cdot Y_{bi} \cdot R_s \cdot e^{j \cdot (\varphi_{ibi} + \varphi_{ybi})} \right)^2} \\ \sqrt{\sum_{i=2}^n \left( J_i \cdot Y_{ci} \cdot R_s \cdot e^{j \cdot (\varphi_{ici} + \varphi_{yci})} \right)^2} \end{bmatrix} \circ \vec{k}_j = \sqrt{\sum_{i=2}^n (\vec{i}_{Lji})^2} = \begin{bmatrix} I_{aLj} \\ I_{bLj} \\ I_{cLj} \end{bmatrix}, \quad (5.21)$$

де  $Y_{ai}$ ,  $Y_{bi}$ ,  $Y_{ci}$  – модулі повних провідностей фаз навантаження для  $i$ -тих гармонік струму;  $\varphi_{yai}$ ,  $\varphi_{ybi}$ ,  $\varphi_{ycl}$  – початкові фази відповідних провідностей.

Вектор часткового струму, створюваного трифазним джерелом струму в лінійних проводах СЕ, визначемо за першим Законом Кірхгофа:

$$\vec{i}_{sj} = \vec{J} - \vec{i}_{Lj}. \quad (5.22)$$

Визначимо вектор струму, що протікає в колі лінійного навантаження:

$$\vec{i}_L = \sqrt{(\vec{i}_e)^2 + (\vec{i}_{Lj})^2} \quad (5.23)$$

і знайдемо вектор напруги на затискачах навантаження:

$$\vec{u}_L = \sqrt{(\vec{i}_{e1} \circ \vec{z}_{L1})^2 + \sum_{i=2}^n (\vec{i}_{ei} \circ \vec{z}_{Li})^2 + \sum_{i=2}^n (\vec{i}_{Lji} \circ \vec{z}_{Li})^2}. \quad (5.24)$$

Середня активна корисна потужність навантаження

$$P_{usf} = \operatorname{Re} \left( \vec{u}_L \cdot \sqrt{(\vec{i}_e)^2 + (\vec{i}_{sj})^2} - (\vec{J})^2 \right) = \operatorname{Re} \left( \vec{u}_L \cdot \sqrt{(\vec{i}_L)^2} - 2 \cdot (\vec{J} \circ \vec{i}_{Lj}) \right). \quad (5.25)$$

*Подання моделі в матричній формі.* Векторна форма подання моделі трифазної СЕ має певний недолік, що виявляється в разі полігармонічної форми живлячої напруги. За допомогою векторної форми подання важко описати взаємний вплив вищих гармонійних складових напруги трифазного джерела й вищих гармонік струму, що протікає у фазах нелінійного навантаження. У подібних випадках доцільно використати матричну форму опису моделі.

Задамо напругу на затискачах трифазного джерела матрицею розміром  $n \times 3$ :

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{a1} & \underline{U}_{b1} & \underline{U}_{c1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{U}_{an} & \underline{U}_{bn} & \underline{U}_{cn} \end{bmatrix}. \quad (5.26)$$

Аналогічно запишемо матрицю струму трифазного джерела струму:

$$\mathbf{j} = \begin{bmatrix} \underline{J}_{a2} & \underline{J}_{b2} & \underline{J}_{c2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{J}_{an} & \underline{J}_{bn} & \underline{J}_{cn} \end{bmatrix}. \quad (5.27)$$

Окремо задамо матриці комплексних опорів навантаження для струмів у схемах із трифазним джерелом напруги й трифазним джерелом струму:

$$\mathbf{z}_u = \begin{bmatrix} \underline{z}_{au1} & \underline{z}_{bu1} & \underline{z}_{cu1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{z}_{aun} & \underline{z}_{bun} & \underline{z}_{cun} \end{bmatrix}, \quad (5.28)$$

$$\mathbf{z}_j = \begin{bmatrix} \underline{z}_{aj2} & \underline{z}_{bj2} & \underline{z}_{cj2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{z}_{ajn} & \underline{z}_{bjn} & \underline{z}_{cjn} \end{bmatrix}. \quad (5.29)$$

Виразимо матрицю комплексних провідностей фаз для струмів у схемі з трифазним джерелом напруги:

$$\mathbf{y}_u = \frac{\mathbf{M}_u}{\mathbf{z}_u + R_s}. \quad (5.30)$$

де  $\mathbf{M}_u$  – матриця станів розміром  $n \times 3$ , рядки якої набувають одиничного значення за наявності відповідних гармонійних складових у спектрі напруги трифазного джерела.

Запишемо вектор сумарних комплексних провідностей фаз трифазної чотирипровідної системи:

$$\vec{y}_s = \mathbf{y}_u \cdot \vec{v} + R_n^{-1}. \quad (5.31)$$

Подамо струм у нульовому проводі, обумовлений вищими гармонійними складовими трифазного джерела струму, які кратні трьом, у вигляді вектора, завдовжки  $n$ :

$$\vec{i}_{3j} = \mathbf{j} \circ \frac{\mathbf{z}_j}{R_s + 3 \cdot R_n + \mathbf{z}_j} \cdot \vec{v}. \quad (5.32)$$

Напругу зсуву нейтралі при полігармонічній напрузі і полігармонічному струмі подамо у вигляді вектора, задовжки  $n$ :

$$\vec{u}_0 = \frac{\mathbf{y}_u \circ \mathbf{u}}{\vec{y}_s} \cdot \vec{v} - \vec{i}_{3j} \cdot R_n. \quad (5.33)$$

Матриця струмів у лінійних проводах на схемі з трифазним джерелом напруги

$$\mathbf{i}_e = (\mathbf{u} - \vec{u}_0 \cdot \vec{v}^T) \circ \mathbf{y}_u. \quad (5.34)$$

За допомогою матричних співвідношень (5.27) і (5.29) виразимо часткові струми трифазного джерела струму в навантаженні й лінійних проводах відповідно:

$$\mathbf{i}_{Lj} = \mathbf{j} \circ \frac{R_s}{R_s + \mathbf{z}_j}, \quad (5.35)$$

$$\mathbf{i}_{sj} = \mathbf{j} - \mathbf{i}_{Lj}. \quad (5.36)$$

Визначимо повний струм лінії і повний струм, що протікає у фазах лінійного навантаження:

$$\mathbf{i}_s = \mathbf{i}_e - \mathbf{i}_{sj}, \quad (5.37)$$

$$\mathbf{i}_L = \mathbf{i}_e + \mathbf{i}_{Lj} \quad (5.38)$$

і знайдемо напругу на затискачах навантаження:

$$\mathbf{u}_L = \mathbf{i}_e \circ \mathbf{z}_u + \mathbf{i}_{Lj} \circ \mathbf{z}_j. \quad (5.39)$$

Середня активна корисна потужність навантаження

$$P_{usf} = (|\mathbf{u}_L| \circ (|\mathbf{i}_L| - |\mathbf{j}|))^T \cdot \mathbf{M}_u^{(1)} \cdot \vec{v}. \quad (5.40)$$

Обидві описані моделі дають змогу розрахувати значення коефіцієнта корегування  $k_l$ , що забезпечує початкове значення середньої корисної потужності навантаження навіть у разі використання стандартних засобів Mathcad (блока *Given* і функції *Find*). Після цього можна визначити складові потужності втрат і порівняти результати розрахунків у різних режимах роботи.

Як приклад, розглянемо трифазну СЕ, відношення потужності трифазного резистивного короткого замикання до корисної потужності навантаження якої  $k_{sc} = 20$ . Діюче значення фазної синусоїдальної напруги трифазного симетричного джерела  $U_s = 220$  В. Якщо корисна потужність

навантаження в режимі мінімуму втрат  $P_{usf} = 400,1$  кВт, то  $R_s = 0,01815$  Ом,  $R_l = 0,3256$  Ом.

Відповідно до (5.7)–(5.11), окремо розглянемо п'ять режимів роботи СЕ, кожен із яких обумовлений одним фактором, що впливає на виникнення додаткових втрат:

1. Несиметрія напруги.
2. Несиметрія резистивного навантаження.
3. Симетричне активно-індуктивне навантаження при  $\varphi_L = 15^\circ$  ( $L = 0,2777$  мГн).
4. Вищі гармоніки в кривій напруги живлення (непарні гармоніки, амплітуди яких змінюються обернено до їхнього порядкового номера  $U_m/n$ , де  $n = 2i-1$ ,  $i = 2, 3 \dots 19$ ).
5. Симетричне нелінійне навантаження, що зумовлює вищі гармоніки струму (непарні гармоніки, амплітуди яких змінюються обернено до їхнього порядкового номера  $U_m/(n \cdot (R_s + R_l))$ , де  $n = 2i-1$ ,  $i = 2, 3 \dots 19$ ).

Змінювання коефіцієнта  $k_b$  відповідно до (5.14) або (5.15) зумовлює змінювання відповідного відомого енергетичного показника: коефіцієнта несиметрії за зворотною послідовністю  $K_2$ , коефіцієнта потужності  $\cos\varphi$ , коефіцієнта нелінійних спотворень напруги  $THD_u$  і струму  $THD_i$ . На рисунку 5.8 проілюстровано зв'язок зазначених енергетичних показників із закономірним змінюванням коефіцієнта  $k_b$ .

На рисунку 5.9 подано залежності коефіцієнта корегування  $k_l$  від коефіцієнта  $k_b$ , що задає закономірність змінювання несиметричного режиму роботи трифазної трипровідної СЕ за (5.14). Значення коефіцієнта  $k_l$  при  $k_b = 0$  і при  $k_b = \sqrt{2}$  відповідають аварійному режимові роботи трифазного СЕ в разі обриву лінійного проводу. Значення коефіцієнта  $k_l$  при  $k_b = 1$  відповідає симетричному режиму роботи трифазної СЕ, у якій сумарна потужність втрат дорівнює мінімально можливій потужності втрат.



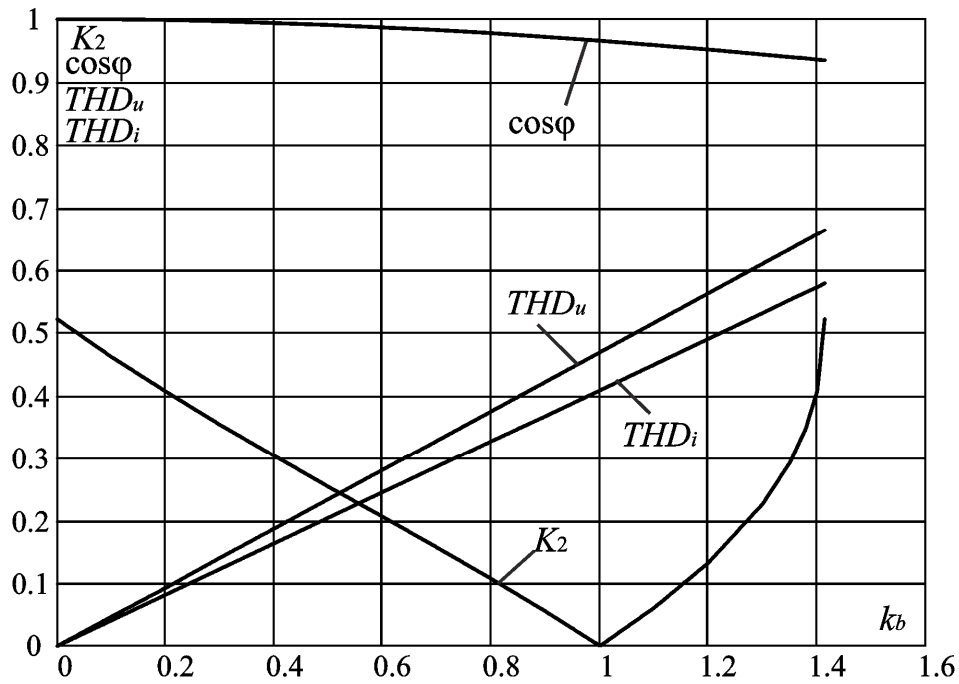


Рисунок 5.8 – Залежність енергетичних показників від коефіцієнта  $k_b$

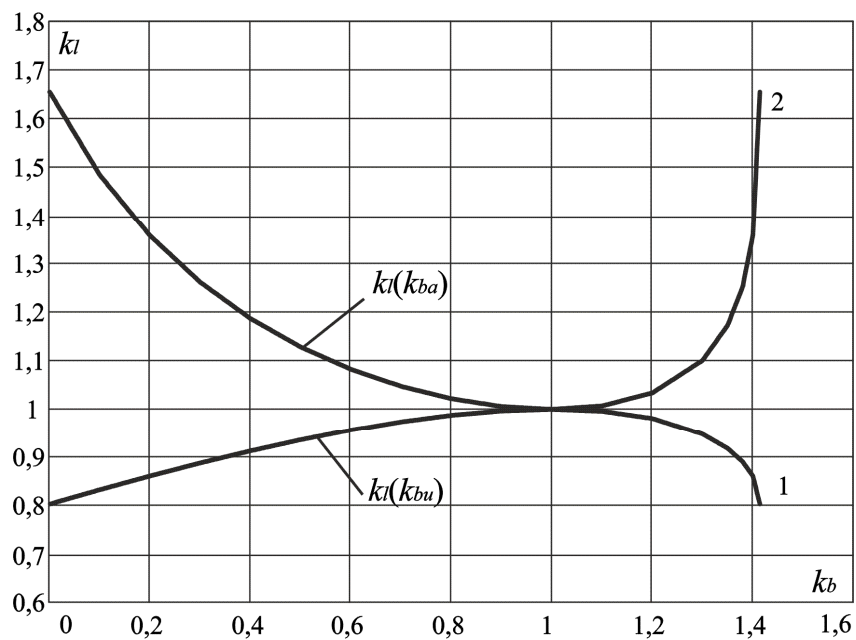


Рисунок 5.9 – Залежності  $k_l = f(k_b)$  для несиметричних режимів трифазної СЕ: 1 – несиметрія трифазного джерела; 2 – несиметрія резистивного навантаження

На рисунку 5.10 подано залежності коефіцієнта корегування  $k_l$  від коефіцієнта  $k_b$ , що задає закономірність змінювання коефіцієнта потужності та амплітуд вищих гармонік напруг і струмів трифазної чотирипровідної СЕ при  $R_n = R_s$  відповідно до (5.15).

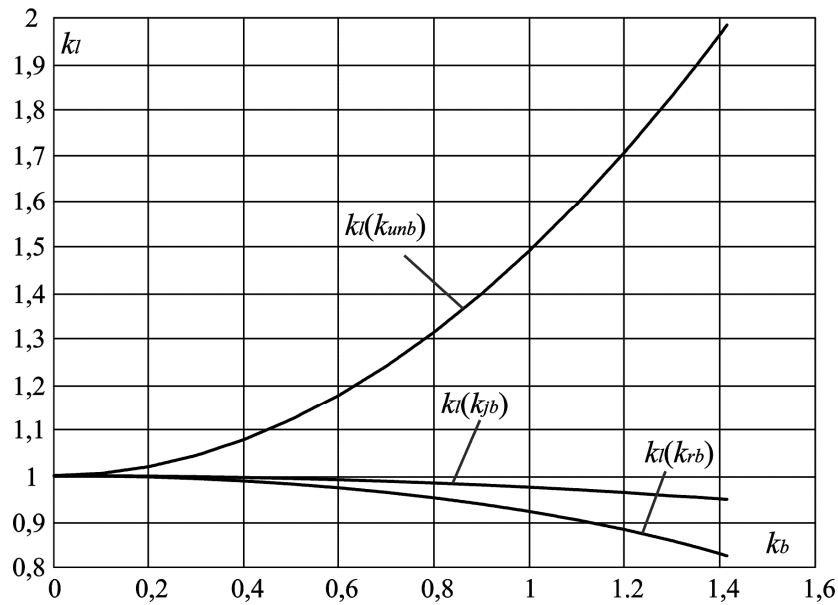


Рисунок 5.10 – Залежності  $k_l = f(k_b)$ :

1 – при активно-індуктивному навантаженні; 2 – при симетричному нелінійному навантаженні; 3 – при вищих гармоніках напруги трифазного джерела

Відхилення умов роботи трифазної СЕ від умов, за яких потужність втрат відповідає мінімальному значенню, призводить до появи додаткових втрат [129]. Отримані математичні моделі дають змогу розрахувати потужність додаткових втрат у будь-якому з 279 режимів роботи трифазної СЕ. На рисунку 5.11 подано залежності відносної (у частці середньої корисної потужності навантаження) потужності додаткових втрат від коефіцієнта  $k_b$  для п'яти розглядуваних режимів роботи трифазної СЕ.

Аналіз залежностей на рисунку 5.11 доводить, що потужність додаткових втрат у трифазній СЕ при  $k_{sc} = 20$  може становити від декількох часток відсотка до декількох відсотків від середньої корисної потужності навантаження. Найменшою енергоефективністю характеризуються трифазні СЕ з нелінійним навантаженням. Поєднання факторів, що обумовлюють додаткові втрати, знижує енергоефективність трифазних СЕ.

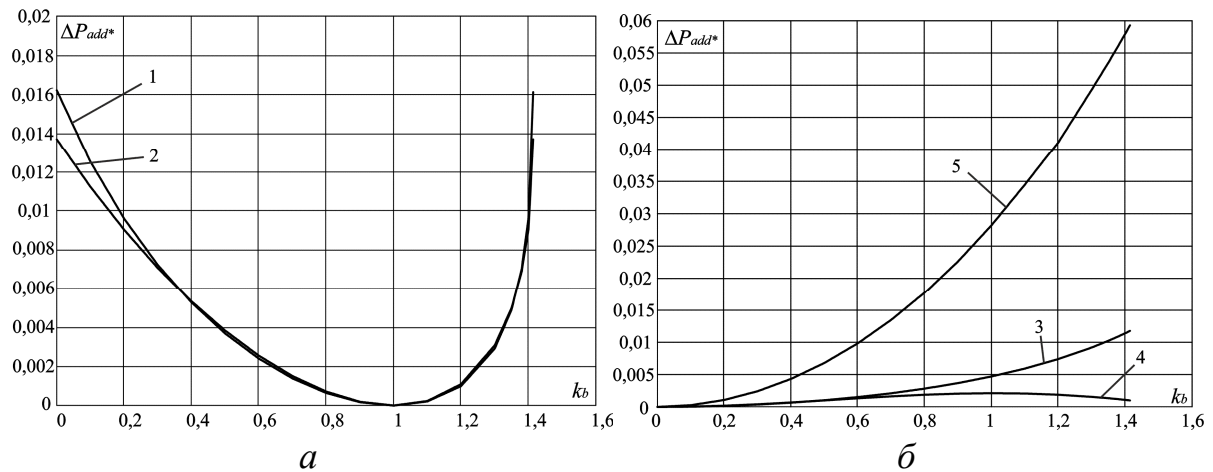


Рисунок 5.11 – Залежність відносної потужності додаткових втрат від коефіцієнта  $k_b$ :

$a$  – у режимі 1 і 2;  $b$  – у режимі 3, 4 і 5

Аналітичні дані, отримані за допомогою розробленої моделі (5.26)–(5.40) для п'яти розглянутих випадків, подано в таблиці 5.4.

Відповідно до еквівалентної схеми рисунка 5.6 і матричної математичної моделі (5.26) – (5.40) створено Matlab-модель трифазної СЕ, подана на рисунку 5.12. Вона відрізняється від створених раніше моделей [43; 44; 129] наявністю оптимізованої структури навантаження, яке розподіляється на симетричне резистивне навантаження й регульоване трифазне джерело струму, і блока автоматизованого обчислення коефіцієнта корегування  $k_l$  (kl\_Calculation).

Таблиця 5.4 – Розрахунок коефіцієнтів корегування й енергетичних показників для п'яти режимів роботи трифазного СЕ

$k_b$	Режим 1			Режим 2			Режим 3			Режим 4			Режим 5		
	$k_{lu}$	$K_{2U}$	$\Delta P_{add*}$	$k_{la}$	$K_{2I}$	$\Delta P_{add*}$	$k_{lr}$	$\cos\varphi$	$\Delta P_{add*}$	$k_{lun}$	$THD_u$	$\Delta P_{add*}$	$k_{lj}$	$THD_i$	$\Delta P_{add*}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0,8028	0,522	0,0137	1,6551	0,522	0,01612	1	1	0	1	0	0	1	0	0
0,1	0,8324	0,462	0,0112	1,4839	0,462	0,01251	0,9993	1	0,00004	1,0021	0,047	0,00005	0,9997	0,041	0,0003
0,2	0,8608	0,407	0,009	1,3576	0,407	0,0096	0,9971	0,999	0,00016	1,0084	0,094	0,0002	0,9989	0,082	0,0011
0,3	0,8877	0,354	0,0071	1,2615	0,354	0,0072	0,9935	0,997	0,00037	1,0188	0,141	0,0004	0,9975	0,123	0,0024
0,4	0,9129	0,304	0,0053	1,1868	0,304	0,0053	0,9883	0,994	0,00066	1,0336	0,188	0,0007	0,9957	0,164	0,0044
0,5	0,9359	0,254	0,0038	1,1282	0,254	0,0037	0,9816	0,991	0,00104	1,0526	0,235	0,00101	0,9932	0,205	0,0068
0,6	0,9564	0,206	0,0025	1,0824	0,206	0,0024	0,9733	0,987	0,00153	1,0759	0,282	0,00134	0,9902	0,246	0,0099
0,7	0,9738	0,157	0,0015	1,0473	0,157	0,0014	0,9634	0,983	0,00212	1,1037	0,329	0,00164	0,9866	0,287	0,0135
0,8	0,9875	0,107	0,0007	1,0218	0,107	0,00064	0,9516	0,978	0,00284	1,1359	0,367	0,0019	0,9825	0,328	0,0178
0,9	0,9966	0,055	0,0002	1,0058	0,055	0,00017	0,9378	0,972	0,0037	1,1726	0,423	0,0021	0,9778	0,368	0,0227
1,0	1	0	0	1	0	0	0,9219	0,966	0,0047	1,214	0,47	0,00213	0,9725	0,409	0,0283
1,1	0,9958	0,061	0,00023	1,0071	0,061	0,00021	0,9035	0,959	0,00595	1,26	0,517	0,0021	0,9665	0,45	0,0345

Продовження таблиці 5.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1,2	0,9808	0,133	0,0011	1,0338	0,133	0,001	0,8825	0,952	0,00743	1,3109	0,564	0,0019	0,96	0,491	0,0415
1,3	0,9479	0,227	0,0031	1,1008	0,227	0,0029	0,8581	0,944	0,00922	1,3665	0,611	0,00156	0,9525	0,532	0,0494
1,35	0,918	0,293	0,0049	1,1731	0,293	0,0049	0,8445	0,94	0,01027	1,3962	0,634	0,00135	0,949	0,553	0,0536
1,38	0,8901	0,35	0,0069	1,2538	0,35	0,007	0,8358	0,938	0,01095	1,4145	0,648	0,0012	0,9466	0,565	0,0562
1,4	0,8608	0,407	0,009	1,3576	0,407	0,0096	0,8298	0,936	0,01144	1,427	0,657	0,0011	0,945	0,573	0,058
1,414	0,8028	0,522	0,0137	1,6551	0,522	0,0161	0,8254	0,935	0,0118	1,436	0,664	0,00101	0,9438	0,579	0,0593

### 5.2.3 Matlab-модель трифазної системи електропостачання

У разі завдання значень елементів векторів (5.7) – (5.11) модель дає змогу без участі оператора автоматично обчислювати коефіцієнт  $k_l$  і розраховувати значення складових сумарної потужності втрат із урахуванням обчисленого коефіцієнта.

Matlab-модель включає такі елементи:

1. Силу схему, виконану відповідно до рисунка 5.6, що містить:

- трифазне джерело симетричних синусоїдальних напруг  $U_{sa}$ ,  $U_{sb}$ ,  $U_{sc}$ ;
- трифазне джерело несинусоїдальних напруг  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$ ;
- симетричне резистивне навантаження  $R_{la}$ ,  $R_{lb}$ ,  $R_{lc}$ ;
- трифазне джерело струму  $J_a$ ,  $J_b$ ,  $J_c$ ;
- активні опори чотирипровідної лінії  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$ ,  $R_n$ ;
- силовий активний фільтр, виконаний на трьох регульованих джерелах струму SAF.

джерелах струму SAF.

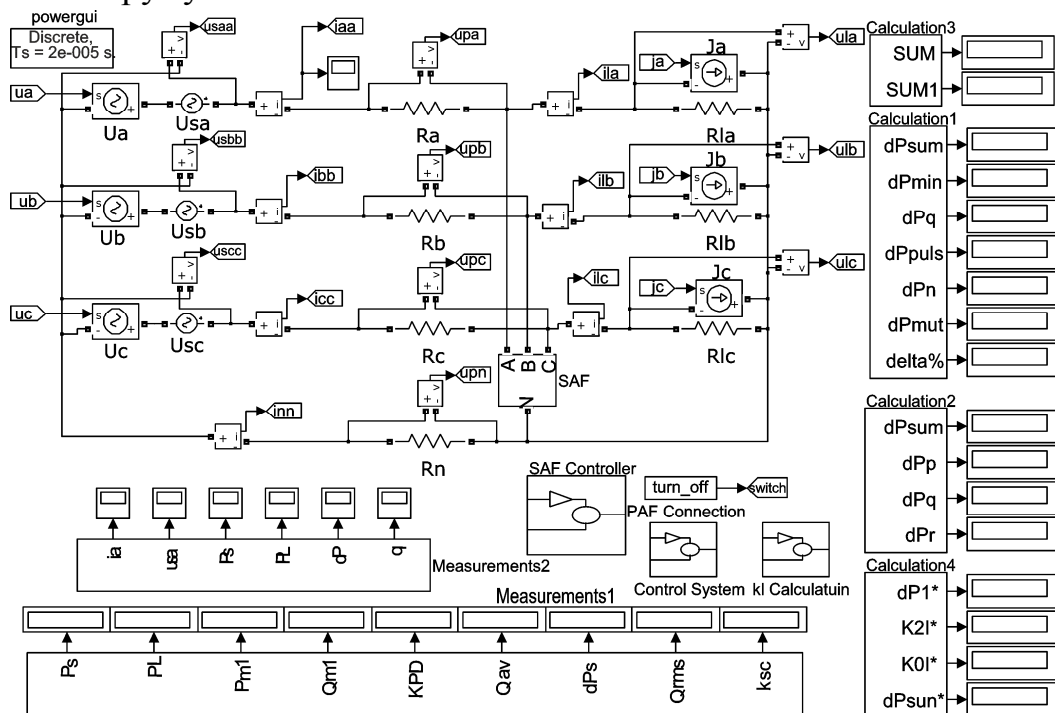


Рисунок 5.12 – Matlab-модель еквівалентної схеми трифазної СЕ з САФ

2. Давачі струму й напруги, що підмикаються до силової схеми моделі.
3. Підсистеми обробки вимірювальної інформації:
  - підсистема розрахування складових сумарної потужності втрат відповідно до (3.74) Calculation 1 (рис. 5.13);

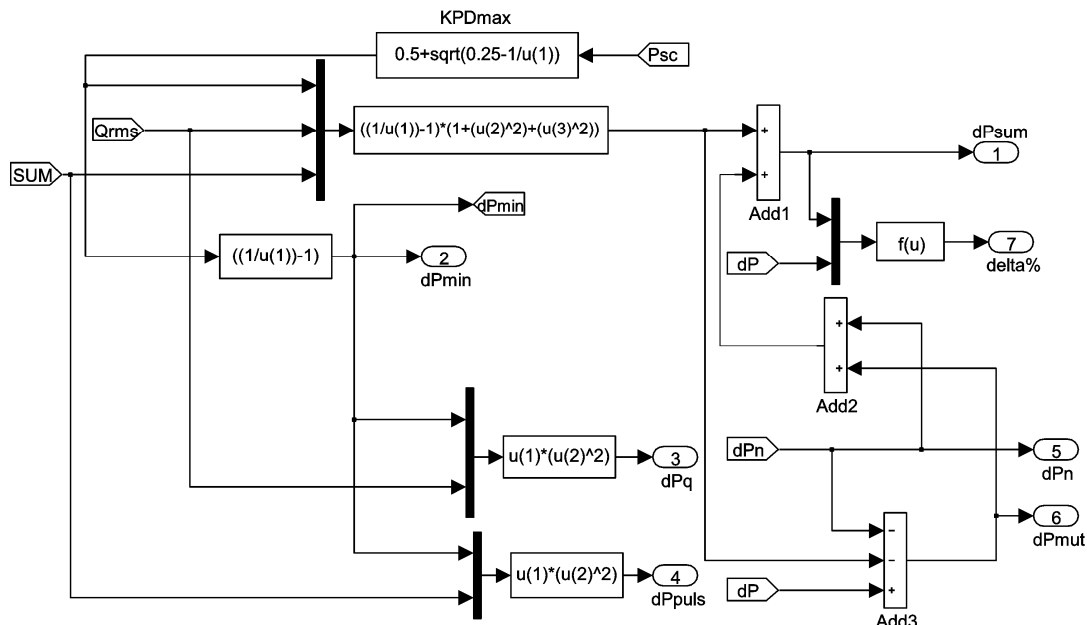


Рисунок 5.13 – Підсистема розрахування складових сумарної потужності втрат відповідно до (3.74) Calculation 1

- підсистема розрахування складових сумарної потужності втрат в  $pqr$ -координатах Calculation 2 (рис. 5.14);
- підсистема розрахування гармонійного складу корисної потужності навантаження Calculation 3;
- підсистема розрахування складових сумарної потужності втрат через коефіцієнти прямої, зворотної та нульової послідовності Calculation 4 (рис. 5.15);
- підсистема розрахування й індикації вимірювальної інформації про миттєві значення електричних величин і параметрів трифазної СЕ Measurements 1;
- підсистема розрахування й індикації вимірювальної інформації про середні й діючі значення електричних величин та параметрів трифазної СЕ Measurements 2 (рис. 5.16).

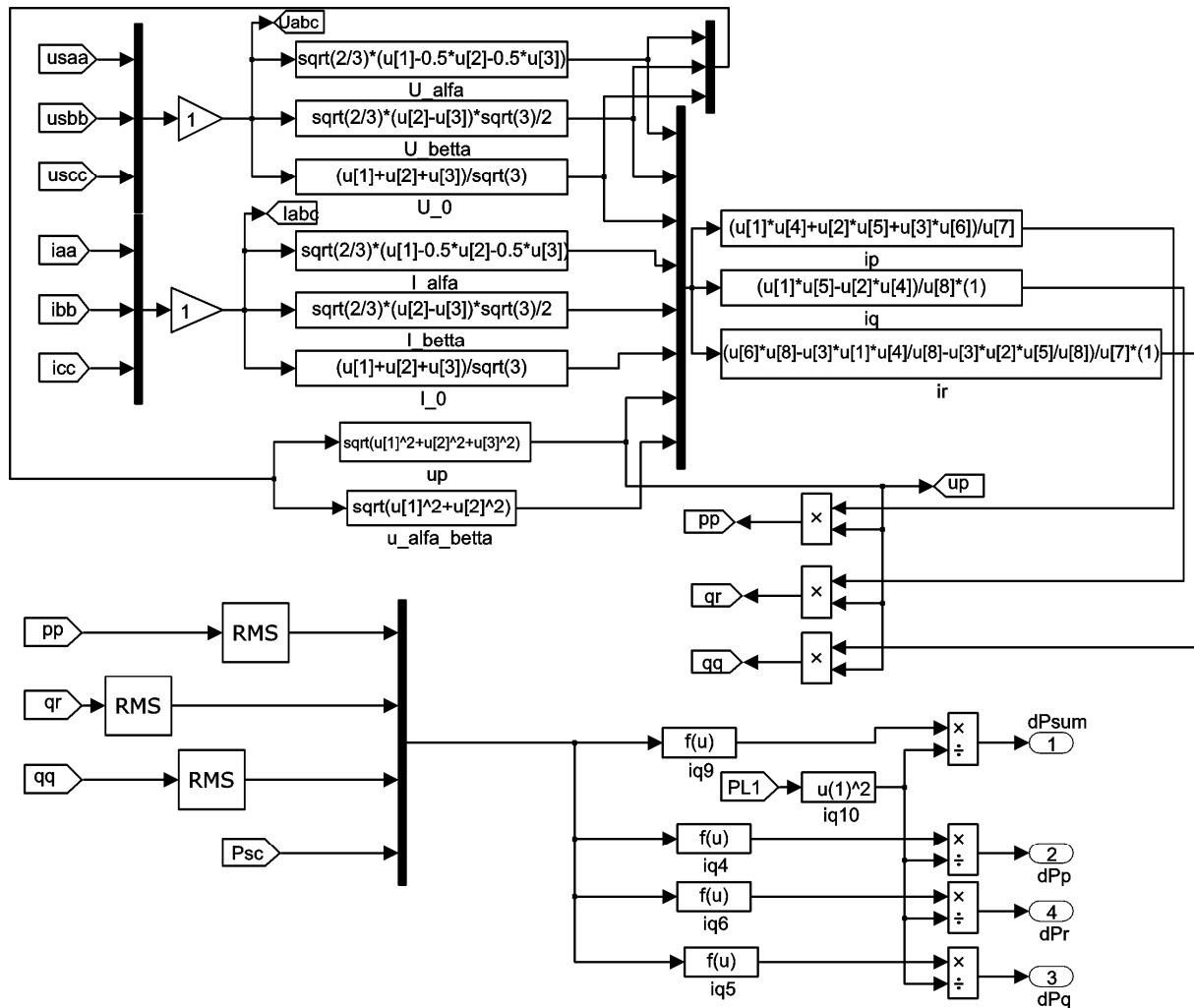


Рисунок 5.14 – Підсистема розрахування складових сумарної потужності втрат в pqr-координатах Calculation 2

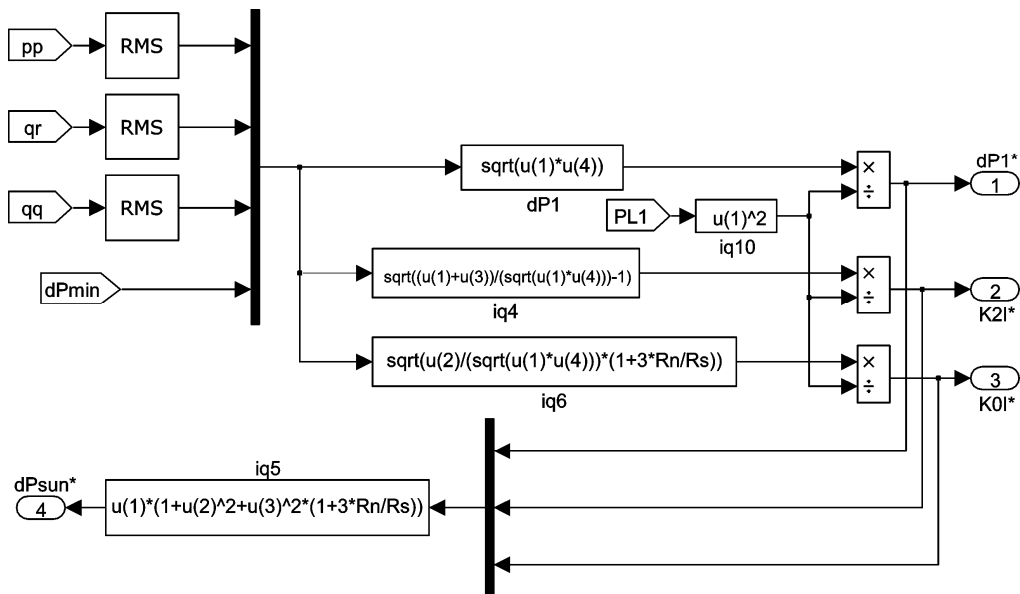


Рисунок 5.15 – Підсистема розрахування складових сумарної потужності втрат через коефіцієнти прямої, зворотної та нульової послідовності Calculation 4

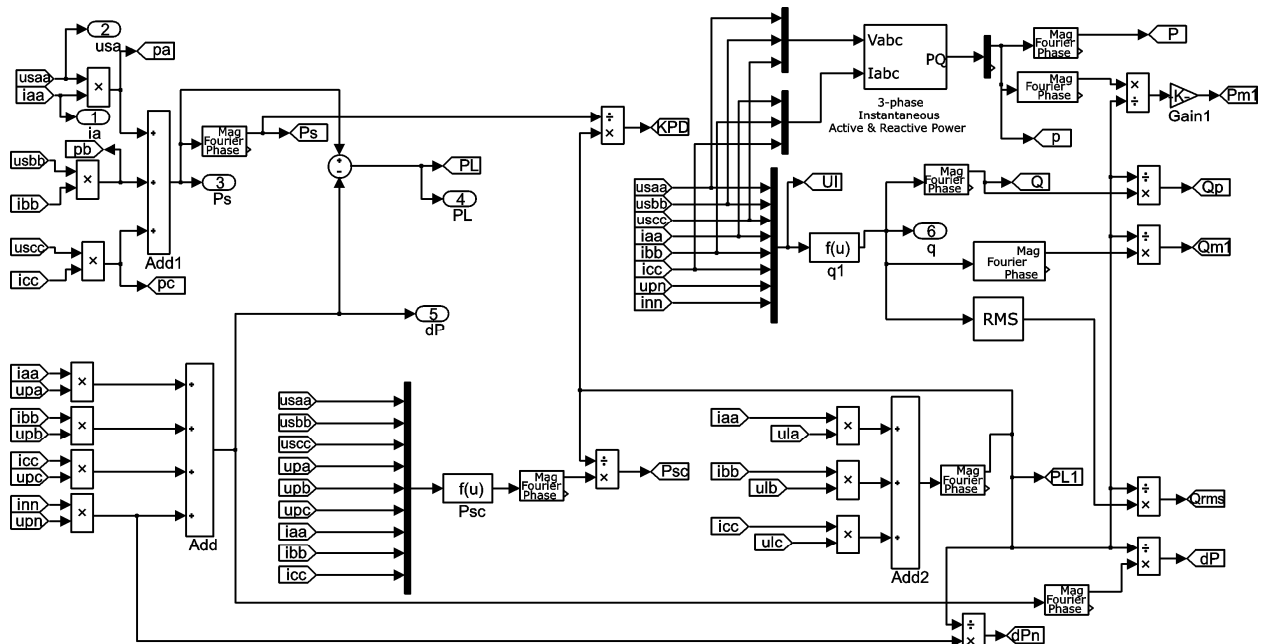


Рисунок 5.16 – Підсистема розрахунку та індикації вимірювальної інформації про миттєві значення електричних величин і параметрів трифазної СЕ Measurements 2

#### 4. Підсистеми управління й контролю за станом СЕ:

- система управління САФ SAF Controller (рис. 5.17);
- підсистема завдання сигналів управління трифазним джерелом струму й трифазним джерелом несинусоїдальної напруги Control System;
- підсистема розрахунку коефіцієнта корегування  $k_l$   $k_l$  Calculation;
- блок підімкнення до СЕ силового активного фільтра PAF Connection.

#### 5. Віртуальні вимірювальні прилади.

Розроблену Matlab-модель можна використовувати для аналізу трифазних систем електропостачання й оцінки енергетичної ефективності в разі підімкнення до системи силового активного фільтра в будь-якому з 288 можливих режимів роботи.

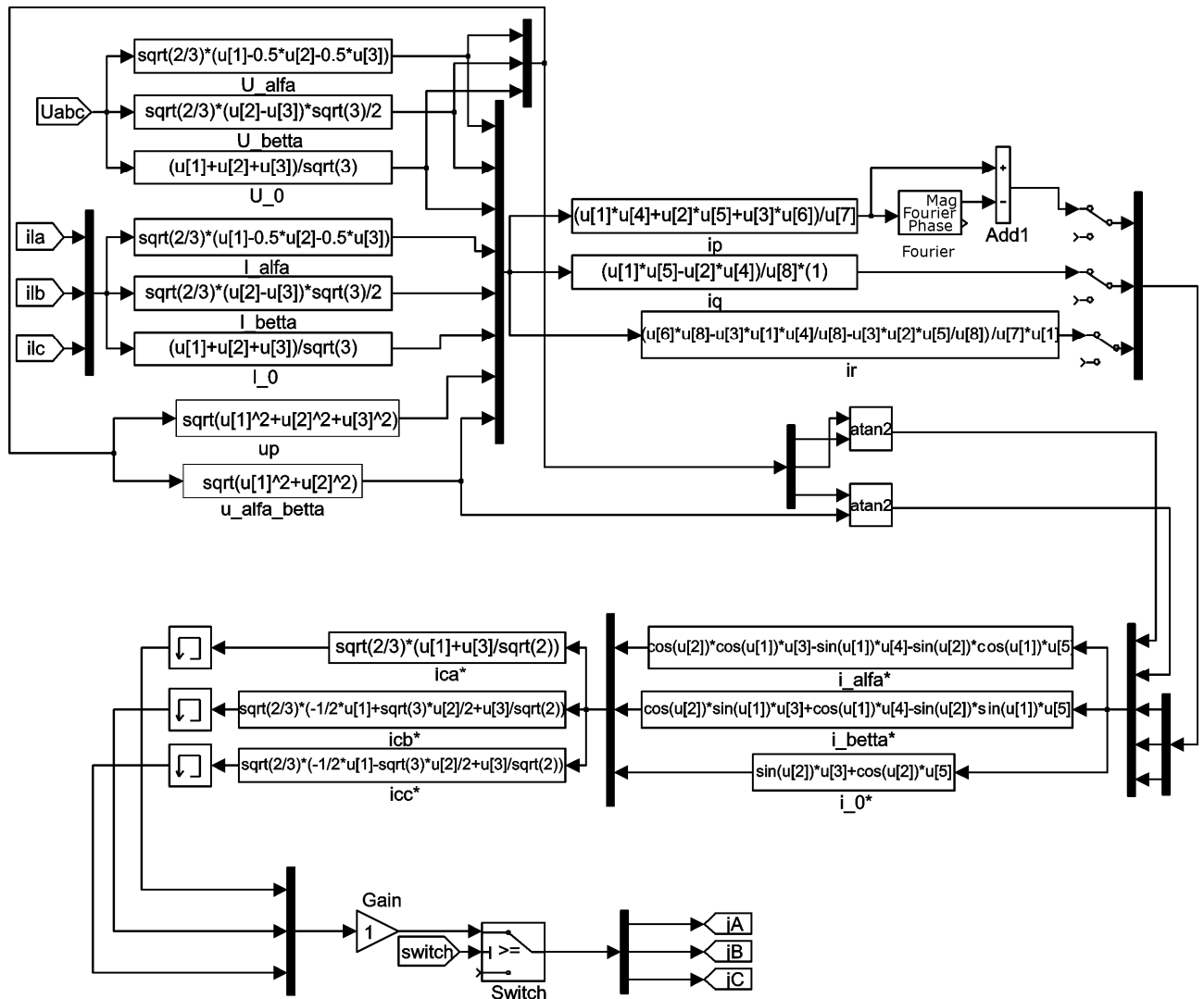


Рисунок 5.17 – Система управління САФ SAF Controller

### 5.3 Перевірка розрахування складових сумарної потужності втрат

#### 5.3.1 Моделювання симетричних трифазних систем електропостачання

Перевірка отриманих в підрозділі 3.2 теоретичних результатів, а саме коректності розрахункової формули (3.60) здійснювалася за допомогою Matlab-моделі трифазної СЕ, розглянутої в попередньому підрозділі.

Для моделювання було обрано такі параметри СЕ: амплітуда синусоїдальної напруги джерела  $U_{sm} = 311$  В; відносне значення потужності короткого замикання СЕ  $k_{sc} = 20$ ; корисна потужність навантаження  $P_{usf} = 133$  кВт; амплітуда фазних струмів симетричного резистивного навантаження при максимально можливому ККД СЕ ( $\eta_{max} = 0,947$ )  $I_{mL} = 301$  А; опір лінійних проводів  $R_s = 0,0548$  Ом [29].



Експеримент на Matlab-моделі проводили для трифазної симетричної СЕ в діапазоні змінювання відносного значення діючої реактивної потужності  $Q_{RMS}^*$  від 0 до 1 при незмінному значенні середньої (середньоквадратичної) активної корисної потужності навантаження  $P_{usf} = P_{RMSusf} = \text{const}$ . Струми симетричного реактивного навантаження задавалися блоками Ja, Jb, Jc. Незмінність значення  $P_{usf}$  при збільшенні відносної діючої реактивної потужності досягалася вбудованою в модель автокорекцією коефіцієнта  $k_l$  за методикою, описаною в попередньому підрозділі. Результати моделювання подано в таблиці 5.5. За допомогою моделі виміряли: сумарну потужність СЕ  $P_s$ ; КДП СЕ  $\eta$ ; відносну середню в періоді повторюваності сумарну потужність втрат енергії  $\Delta P_{\Sigma}^*$ ; відносне значення додаткової потужності втрат, обумовлених реактивною потужністю  $\Delta P_Q^*$ ; відносні амплітуди перших гармонік пульсацій відповідно миттєвої активної  $P_{m1}^*$  і реактивної  $Q_{m1}^*$  потужностей; середнє значення модуля вектора реактивної потужності, обчислене в періоді повторюваності,  $Q_{AV}^*$ ; середню корисну потужність навантаження  $P_{usf}$ ; відносну середньоквадратичну сумарну потужність втрат енергії  $\Delta P_{RMS\Sigma}^*$ .

Таблиця 5.5 – Результати моделювання симетричної СЕ

$Q_{RMS}^*$	$I_{mL}, A$	$I_{ml}, A$	$P_s, \text{кВт}$	$P_{usf}, \text{кВт}$	$\eta$	$\Delta P_{\Sigma}^*$	$\Delta P_Q^*$	$P_{m1}^*$	$Q_{m1}^*$	$Q_{AV}^*$	$\Delta P_{RMS\Sigma}^*$
0	300,9	0	140,41	133	0,947	0,05596	0	0	0	0	0,05596
0,1	301	28,5	140,51	133	0,9465	0,05652	0,00056	0	0	0,1	0,05652
0,2	301,5	56,9	140,7	133	0,945	0,0582	0,00224	0	0	0,2	0,0582
0,3	302,4	85,5	141,18	133	0,9425	0,06103	0,00507	0	0	0,3	0,06103
0,4	303,4	114	141,67	133	0,939	0,06495	0,00899	0	0	0,4	0,06495
0,5	304,9	142	142,35	133	0,9346	0,07	0,01404	0	0	0,5	0,07
0,6	306,8	171	143,22	133	0,9292	0,07623	0,02027	0	0	0,6	0,07623
0,7	308,8	199	144,19	133	0,9229	0,08353	0,02757	0	0	0,7	0,08353
0,8	311,1	228	145,25	133	0,9158	0,09195	0,03599	0	0	0,8	0,09195
0,9	313,7	256	146,51	133	0,9079	0,1015	0,04554	0	0	0,9	0,1015
1	317	285	147,96	133	0,899	0,1124	0,05644	0	0	1	0,1124

У таблиці 5.6 співставлено експериментальні результати, отримані на Matlab-моделі, із результатами розрахунків за (3.60).

Таблиця 5.6 – Співставлення результатів розрахунків і експерименту

$Q_{RMS}^*$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\Delta P_{\Sigma \text{расч}}^*$	0,05597	0,05653	0,0582	0,061	0,06492	0,06996	0,07611	0,08339	0,09178	0,1013	0,1119
$\Delta P_{\Sigma \text{эскп}}^*$	0,05596	0,05652	0,0582	0,06103	0,06495	0,07	0,07623	0,08353	0,09195	0,1015	0,1124

Співставлення результатів моделювання, поданих у таблиці 5.5, із результатами теоретичних розрахунків показало високий ступінь збігу.

Результати моделювання симетричних систем можна розповсюдити на асиметричні системи, для яких розрахування сумарної потужності втрат за формулою (3.60) не є коректним, наприклад СЕ з трифазним симетричним джерелом і резистивним асиметричним навантаженням.

У таблиці 5.7 подано результати моделювання асиметричної трифазної СЕ. Асиметрія резистивного навантаження задавалася змінюванням струму у фазі С СЕ за  $I_{maL} = I_{mbL} = 300,9$  А.

Таблиця 5.7 – Результати моделювання асиметричної СЕ

$Q_{RMS}^*$	$I_{mcL},$ А	$I_{ml},$ А	$P_s,$ кВт	$P_{AVusf},$ кВт	$\eta$	$\Delta P_{\Sigma}^*$	$\Delta P_Q^*$	$P_{m1}^*$	$Q_{m1}^*$	$Q_{AV}^*$	$\Delta P_{RMS}^*$
0	300,9	0	140,41	133	0,947	0,05596	0	0	0	0	0,05596
0,1	230,9	23,3	140,41	132,9	0,9464	0,05659	0,00063	0,08	0,03	0,09	0,07819
0,2	161,2	45,86	140,12	132,3	0,9446	0,05834	0,00238	0,16	0,05	0,19	0,08167
0,3	91,47	67,83	139,54	131,4	0,9416	0,06124	0,00528	0,25	0,08	0,28	0,087
0,4	21,62	89,45	138,76	130	0,9374	0,06531	0,00935	0,33	0,1	0,37	0,09401
0,5	-48,3	110,5	137,7	128,3	0,9319	0,07051	0,01455	0,41	0,13	0,47	0,1024
0,6	-118	130,6	136,25	126	0,9251	0,07676	0,0208	0,49	0,15	0,56	0,1118
0,7	-188	150,3	134,6	120,7	0,9168	0,08415	0,02819	0,57	0,18	0,65	0,1255
0,8	-258	168,9	132,37	120	0,907	0,09254	0,03658	0,65	0,2	0,75	0,1341
0,9	-327	186,4	129,76	116,1	0,8954	0,1019	0,04594	0,73	0,23	0,84	0,1467
1	-398	202,8	126,47	111,4	0,8818	0,1123	0,05634	0,82	0,25	0,93	0,1603

Унаслідок протікання струму в нульовому проводі, а також присутності пульсацій у кривих миттєвої активної й реактивної потужностей подана система не є еквівалентною за додатковими втратами енергії аналогічній симетричній системі. Для адекватності співставлення результатів досліджень симетричної й асиметричної СЕ було прийнято такі припущення: виключено опір нульового проводу; під час проведення експерименту за допомогою коефіцієнта  $k_l$  підтримувалося постійним середньоквадратичне значення активної потужності, що вимірювалось у періоді повторюваності  $P_{RMSusf} = \text{const} = 133$  кВт.

Співставлення розрахунків середньої потужності додаткових втрат  $\Delta P_Q^*$ , що є функцією модуля вектора діючої реактивної потужності, симетричної і асиметричної систем електропостачання (див. табл. 5.5 і 5.7) показало практичний збіг у межах статистичної похибки, що уможливило поширення теоретичних співвідношень для симетричної СЕ на асиметричні системи.

У разі приведення асиметричної системи до симетричної однакове збільшення модуля реактивної потужності спричинить відповідний рівень збільшення потужності додаткових втрат для обох систем. Варто зазначити, що розглядувана асиметрична система ідеалізована внаслідок відсутність втрат у нульовому проводі, обліковувати які необхідно під час дослідження реальних чотирипровідних СЕ.

Для перевірки співвідношення (3.63), отриманого у підрозділі 3.3.2, за допомогою Matlab-моделі досліджувалися дві причини виникнення додаткових втрат у трифазній трипровідній СЕ: асиметрія резистивного навантаження (режим №1) та наявність нелінійних елементів у навантаженні (режим № 2). Для проведення віртуального експерименту було обрано такі параметри елементів моделі:  $k_{sc} = 10, 15, 20$ ;  $U_m = 311,13$  В;  $f_s = 50$  Гц;  $P_{usf} = \text{const} = 400,1$  кВт;  $R_s = 0,01815$  Ом;  $R_{load} = 0,3256$  Ом;  $R_n = \infty$  [24].

### 5.3.2 Перевірка розрахункового співвідношення, що обумовлює залежність додаткових втрат від реактивної потужності й пульсацій миттєвої активної потужності

Асиметрії резистивного навантаження досягали шляхом множення фазних активних опорів навантаження  $R_{load}$  на відповідний коефіцієнт:

$$\begin{bmatrix} R_{la} \\ R_{lb} \\ R_{lc} \end{bmatrix} = k_l \cdot R_{load} \cdot \begin{bmatrix} k_{aa} \\ k_{ab} \\ k_{ac} \end{bmatrix}, \quad (5.41)$$

де  $k_{aa}, k_{ab}, k_{ac}$  – коефіцієнти асиметрії резистивного навантаження відповідно до (5.13) ( $k_{aa} = 1, k_{ab} = 1,4, k_{ac} = 0,2$ );  $k_l$  – коефіцієнт пропорційності, уведений для підтримання незмінності значення корисної активної потужності навантаження, обчислюваного в періоді повторюваності.

Нелінійне навантаження моделювалося керованими джерелами струму, у які як завдання надходили сумарні сигнали непарних гармонік. Амплітуди й частоти гармонійних складових, розраховувалися зі співвідношення

$$\begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \end{bmatrix} = \frac{U_m}{R_s + R_{load}} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{37} \frac{\sin(n\vartheta)}{n} \\ \sum_{n=1}^{37} \frac{\sin(n\vartheta - 2\pi/3)}{n} \\ \sum_{n=1}^{37} \frac{\sin(n\vartheta - 4\pi/3)}{n} \end{bmatrix}, \quad (5.42)$$

де  $n = 2 \cdot k \pm 1$ ;  $k = 1, 2, 3 \dots 19$ .

Співвідношення (3.63) перевірялося шляхом співставлення результатів розрахунків з результатами вимірювань на Matlab-моделі і визначення відносної похибки результатів розрахунків:

$$\delta_{\Delta P_{\Sigma}} = \frac{|\Delta P_{2\Sigma*} - \Delta P_{1\Sigma*}|}{\Delta P_{1\Sigma*}} \cdot 100\%, \quad (3.43)$$

де  $\Delta P_{1\Sigma*}$  – відносна сумарна потужність втрат, виміряна на Matlab-моделі;  
 $\Delta P_{2\Sigma*}$  – відносна сумарна потужність втрат, розрахована за співвідношенням (3.63).

Результати моделювання та перевірки уточненого розрахункового співвідношення подано в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Результати перевірки уточненого розрахункового співвідношення (3.63)

№	$k_{sc}$	$k_l$	$\eta$	$Q_{RMS*}$	$P_{pulsRMS*}$	$\Delta P_{1\Sigma*}$	$\Delta P_{2\Sigma*}$	$\Delta P_{min*}$	$\Delta P_Q*$	$\Delta P_{puls*}$	$\delta_{\Delta P_{\Sigma}}, \%$
1	10	1,326	0,8696	0,2928	0,298	0,15	0,1496	0,127	0,01128	0,01128	0,286
	15	1,348	0,9167	0,2945	0,2945	0,0909	0,09081	0,07735	0,00671	0,00671	0,098
	20	1,358	0,9387	0,2928	0,2928	0,06532	0,0653	0,05574	0,00477	0,04775	0,027
2	10	0,9887	0,8783	0,2964	0,04266	0,1386	0,1384	0,127	0,01116	0,00023	0,133
	15	0,993	0,9222	0,2955	0,04253	0,08434	0,08425	0,07735	0,00675	0,00014	0,109
	20	0,995	0,9428	0,2951	0,04243	0,06072	0,0607	0,05574	0,00485	0,0001	0,03

Із таблиці 5.8 зрозуміло, що співставлення результатів розрахунків за (3.63) і результатів експерименту на Matlab-моделі показало високу точність збігу. Крім того, у разі асиметричного резистивного навантаження складові потужності втрат, зумовлені реактивною потужністю та пульсаціями миттєвої активної потужності, співпадають за величиною. Відсотковий внесок кожної зі складових до загальних сумарних втрат для

режиму з асиметричним резистивним навантаженням –  $\Delta P_{\min}^* = 85 \%$ ,  $\Delta P_{Q^*} = 7,5\%$ ,  $\Delta P_{puls}^* = 7,5 \%$ ; для режиму з симетричним нелінійним навантаженням –  $\Delta P_{\min}^* = 91,8 \%$ ,  $\Delta P_{Q^*} = 8 \%$ ,  $\Delta P_{puls}^* = 0,2 \%$ . Відсотковий внесок складових втрат до спільних сумарних втрат не залежить від відношення потужності резистивного короткого замикання й корисної потужності навантаження, тобто є однаковим для будь-якої СЕ з ідентичними умовами виникнення додаткових втрат.

### 5.3.3 Перевірка наближеного співвідношення для розрахування сумарної потужності втрат як суми чотирьох складових

Для перевірки співвідношення (3.66) за допомогою Matlab-моделі трифазної СЕ, на відміну від випадку, що розглядався у підрозділі 5.3.2, блок трифазного навантаження рисунка 5.6 моделювався з паралельним підімкненням у кожен фазу активно-індуктивного опору й регульованого джерела струму, параметри якого задаються регульовальними коефіцієнтами, що відповідають (5.41), а також таким співвідношенням:

$$L = k_r \cdot L_{load} = \frac{R_{load} \cdot \tan \varphi}{2 \cdot \pi \cdot f_s},$$

$$J = k_j \cdot \sum_n j_i = k_j \cdot \sum_n \frac{U_m}{n \cdot (R_s + R_{load})} \cdot \sin(n \cdot \vartheta),$$
(5.44)

де  $k_r = k_{ra} = k_{rb} = k_{rc}$  – коефіцієнт обліку індуктивного опору (відповідно до (5.11));  $k_j = k_{ja} = k_{jb} = k_{jc}$  – коефіцієнт, що враховує ступінь впливу гармонік (відповідно до (5.9));  $n$  – номер гармоніки.

Зазначені коефіцієнти уможливають моделювання розглянутих варіантів появи складових додаткових втрат у СЕ. Комбінації коефіцієнтів подані в таблиці 5.9.

Складові потужності додаткових втрат розраховувалися для відношення потужності КЗ до середньої корисної потужності навантаження  $k_{SC} = P_{SC}/P_{usf} = 20$  при незмінних величинах:  $U_m = 311,13$  В;  $f_s = 50$  Гц;  $P_{usf} = \text{const} = 400,1$  кВт;  $R_s = 0,01815$  Ом;  $R_{load} = 0,3256$  Ом і трьох значеннях опору нульового проводу:  $R_n = \infty, 0, R_s$  [40].

Під час дослідження СЕ із симетричним змішаним активно-індуктивним навантаженням індуктивність  $L$  розраховувалася за співвідношенням (5.44) для чотирьох значень кута фазового зсуву  $\varphi = 0^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ .

Таблиця 5.9 – Комбінації коефіцієнтів під час моделювання СЕ

Номер режиму	Причина появи додаткових втрат	Комбінації коефіцієнтів
1	Наявність реактивних елементів у навантаженні	$k_l = \text{var}$ $k_{la} = 1$ $k_{lb} = 1$ $k_{lc} = 1$ $k_L = 1$ $k_{garm} = 0$
2	Асиметрія резистивного навантаження	$k_l = \text{var}$ $k_{la} = \text{var}$ $k_{lb} = \text{var}$ $k_{lc} = \text{var}$ $k_L = 0$ $k_{garm} = 0$
3	Наявність нелінійних елементів у навантаженні	$k_l = \text{var}$ $k_{la} = 1$ $k_{lb} = 1$ $k_{lc} = 1$ $k_L = 0$ $k_{garm} = \text{var}$

Під час дослідження СЕ з асиметричним резистивним навантаженням коефіцієнти  $k_{aa}$ ,  $k_{ab}$ ,  $k_{ac}$  обиралися на підставі умови (5.10) при незмінному значенні  $k_{aa} = \text{const} = 1$  і чотирьох значеннях коефіцієнта  $k_{ab} = 1; 1,3; 1,35; 1,4$ .

Під час дослідження СЕ із симетричним нелінійним навантаженням до основної гармоніки струму додавалися вищі непарні гармоніки до 37-ої включно, а також приймалися чотири значення коефіцієнта, що враховує ступінь впливу гармонік  $k_j = 0; 1; 1,5; 2$ .

За допомогою створеної Matlab-моделі СЕ було зіставлено результати теоретичних розрахунків і експериментально визначено відносну сумарну потужність втрат для трьох одиночних причин їхнього виникнення і трьох конфігурацій СЕ. Результати співставлення подані в таблицях 5.10 – 5.12. Номер режиму в назвах таблиць відповідає номеру з таблиці 5.9.

Таблиця 5.10 – Результати розрахування складових потужності додаткових втрат у режимі 1

$R_n$	$k_l$	$\eta$	$Q_{RMS}^*$	$P_{pulsRMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{\min}^*$	$\Delta P_Q^*$	$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}, \%$
$\infty$	1	0,9472	0	0	0,05574	0,05574	0,05574	0	0	0	0
0	0,922	0,943	0,2906	0	0,06046	0,06045	0,05574	0,004708	0	0	0,016
$R_s$	0,842	0,9379	0,4322	0	0,0662	0,06616	0,05574	0,01041	0	0	0,06
	0,6775	0,924	0,6883	0	0,08228	0,08215	0,05574	0,02641	0	0	0,158

Розрахунки перевірялися шляхом вимірювання потужності сумарних втрат на Matlab-моделі СЕ, з визначенням відносної похибки розрахунків за (5.43).

У таблиці 5.13 подано осцилограми миттєвих активної потужності мережі й модуля вектора миттєвої реактивної потужності, отримані на Matlab-моделі для досліджуваних трьох режимів роботи СЕ.

Аналізуючи дані таблиць 5.10 – 5.12 можна зробити висновок про те, що запропоноване наближене розрахункове співвідношення (3.66) дає змогу з високим ступенем точності визначити сумарну потужність втрат і оцінити частки її складових у формуванні додаткових втрат електроенергії залежно від режиму роботи. Детальніший аналіз застосування (3.66) для інших випадків трифазних СЕ подано в додатку Б.

Для режиму № 3 окремо порівняно результати розрахунків за (3.66) з даними комп'ютерного експерименту на Matlab-моделі при більш широкому діапазоні змінювання відношення потужності трифазного резистивного КЗ до середньої корисної потужності навантаження  $k_s = 5, 10, 15, 20, 25, 30$ . Розрахунки й експеримент проводилися для трьох значень опору нульового проводу  $R_n = \infty, 0, R_s$ .

Результати співставлення теоретичних і експериментальних даних наведено у таблиці 5.14. Жирним шрифтом у таблиці виділені результати розрахування за формулою (3.66), а в останній колонці наведено відносну похибку використання розрахункової формули. Аналіз даних таблиці 5.14 підтверджує високу точність розрахування за (3.66) для трифазних трипровідних, а також чотирипровідних СЕ при допущенні  $R_n = 0$ . У разі використання формули (3.66) для трифазної чотирипровідних СЕ при врахуванні опору нульового проводу, вона дає досить точний для інженерних розрахунків результат, однак потребує уточнення під час досліджень із огляду на те, що не враховується взаємний вплив електромагнітних процесів у лінійних проводах і нульовому проводі.

Таблиця 5.11 – Результати розрахування складових потужності додаткових втрат у режимі 2

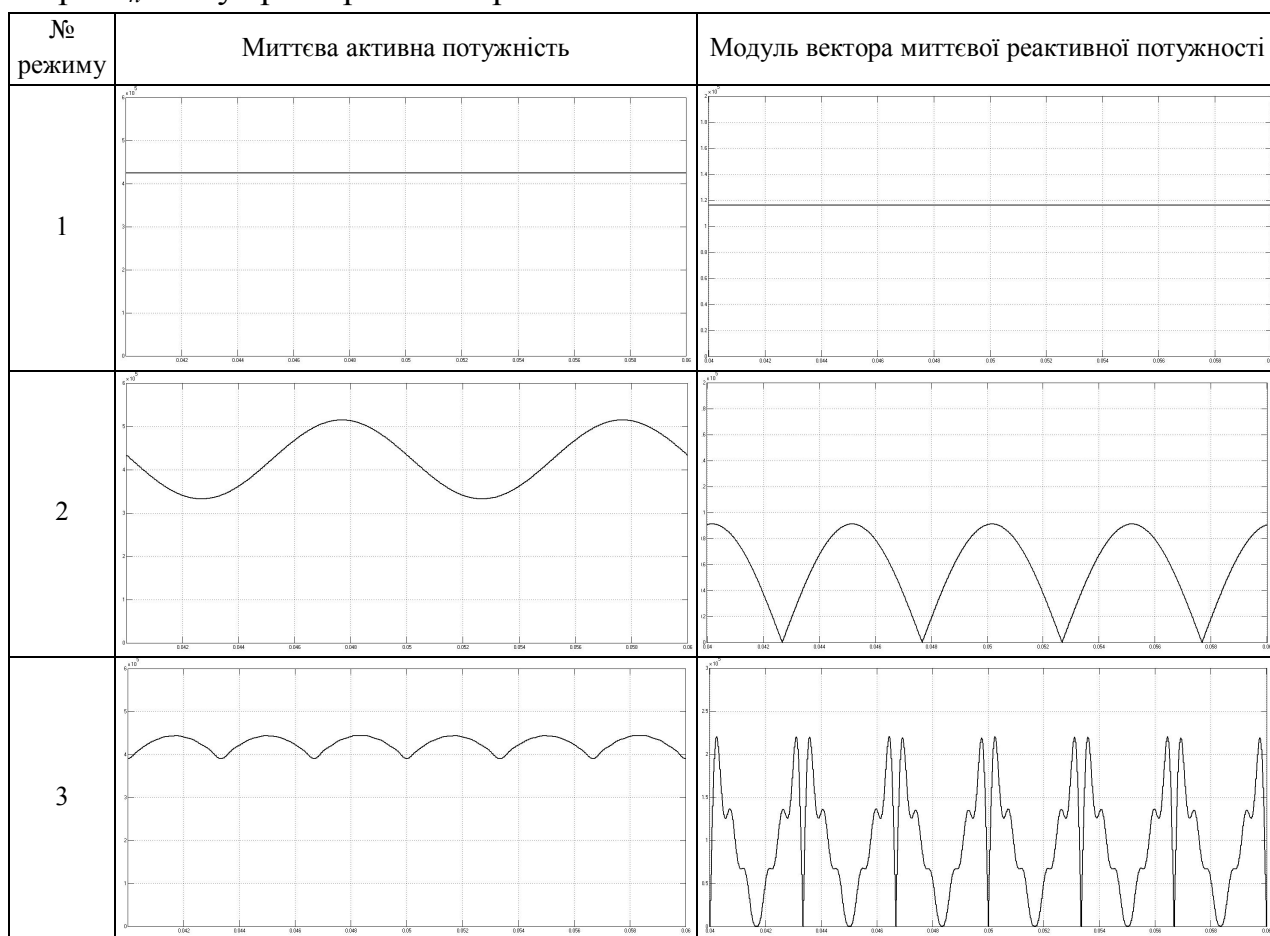
$R_n$	$k_l$	$\eta$	$Q_{RMS}^*$	$P_{pulsRMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{\min}^*$	$\Delta P_Q^*$	$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}, \%$
$\infty$	1	0,9472	0	0	0,05574	0,05574	0,05574	0	0	0	0
	1,1008	0,9446	0,1611	0,1611	0,05865	0,05864	0,05574	0,001447	0,001447	0	0,016
	1,173	0,9428	0,2091	0,2091	0,06064	0,06062	0,05574	0,002437	0,002437	0	0,038
	1,358	0,9387	0,2928	0,2928	0,06532	0,0653	0,05574	0,004775	0,004775	0	0,027
0	1	0,947	0	0	0,05574	0,05574	0,05574	0	0	0	0
	1,1707	0,9403	0,3214	0,1857	0,06345	0,06342	0,05574	0,00576	0,001919	0	0,048
	1,331	0,9334	0,4569	0,2638	0,07131	0,07126	0,05574	0,01164	0,003879	0	0,066
	2,0465	0,9067	0,7941	0,4585	0,1029	0,1026	0,05574	0,03515	0,01172	0	0,259
$R_s$	1	0,9472	0	0	0,05574	0,05574	0,05574	0	0	0	0
	1,1513	0,9335	0,2935	0,18335	0,07126	0,07029	0,05574	0,00480	0,001873	0,00788	1,357
	1,285	0,9194	0,42	0,26007	0,08771	0,08478	0,05574	0,00984	0,00377	0,01633	3,341
	1,8175	0,8604	0,7618	0,46209	0,1623	0,1623	0,05574	0,03236	0,0119	0,05504	4,473

Таблиця 5.12 – Результати розрахування складових потужності додаткових втрат у режимі 3

$R_n$	$k_l$	$\eta$	$Q_{RMS}^*$	$P_{pulsRMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{\min}^*$	$\Delta P_Q^*$	$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}, \%$
$\infty$	1	0,9472	0	0	0,05574	0,05574	0,05574	0	0	0	0
	0,995	0,9428	0,2951	0,04243	0,06072	0,0607	0,05574	0,004854	0,0001	0	0,03
	0,9887	0,9372	0,4451	0,06406	0,06706	0,06702	0,05574	0,01104	0,000229	0	0,07
	0,98	0,9292	0,5983	0,08613	0,07619	0,07611	0,05574	0,01996	0,000413	0	0,102
0	1	0,9472	0	0	0,05574	0,05574	0,05574	0	0	0	0
	0,9876	0,936	0,473	0,04268	0,06836	0,06832	0,05574	0,01247	0,0001	0	0,061
	0,9715	0,9217	0,72	0,06495	0,08501	0,08487	0,05574	0,02889	0,000235	0	0,163
	0,9484	0,9008	0,9809	0,08853	0,1101	0,1098	0,05574	0,05363	0,000437	0	0,286
$R_s$	1	0,9472	0	0	0,05574	0,05574	0,05574	0	0	0	0
	0,9725	0,9225	0,4402	0,04327	0,084	0,08209	0,05574	0,0108	0,000104	0,01545	2,269
	0,9365	0,8902	0,6809	0,06711	0,1233	0,1187	0,05574	0,02585	0,000251	0,03681	3,77
	0,8825	0,8418	0,9527	0,09433	0,1879	0,1784	0,05574	0,05063	0,000496	0,0715	5,074



Таблиця 5.13 – Осцилограми миттєвих потужностей трифазного СЕ при  $R_n = \infty$  у трьох режимах роботи



Таблиця 5.14 – Співставлення результатів розрахунків і експериментів для режиму № 3

$R_n$	$k_{sc}$	$k_l$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{pulsRMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_q^*$	$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_{\eta}^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}, \%$
$\infty$	5	0,9595	0,7024	0,2992	0,04268	0,4236	<b>0,4169</b>	0,382	<b>0,0342</b>	<b>0,00071</b>	0	1,59
	10	0,9887	0,8783	0,2964	0,04258	0,13858	<b>0,13841</b>	0,127	<b>0,01116</b>	<b>0,00023</b>	0	0,126
	15	0,993	0,9222	0,2958	0,04245	0,08434	<b>0,08429</b>	0,07738	<b>0,00677</b>	<b>0,00014</b>	0	0,054
	20	0,995	0,9428	0,2951	0,04243	0,06072	<b>0,0607</b>	0,05574	<b>0,004854</b>	<b>0,0001</b>	0	0,03
	25	0,9963	0,9547	0,2949	0,04235	0,04744	<b>0,04743</b>	0,04356	<b>0,00379</b>	<b>0,000078</b>	0	0,027
	30	0,9969	0,9625	0,2947	0,04233	0,03894	<b>0,03893</b>	0,03576	<b>0,00311</b>	<b>0,000064</b>	0	0,026
0	5	0,8945	0,6684	0,4904	0,04425	0,49617	<b>0,4746</b>	0,382	<b>0,09186</b>	<b>0,00078</b>	0	4,34
	10	0,9711	0,8644	0,4785	0,04318	0,1569	<b>0,15634</b>	0,127	<b>0,02908</b>	<b>0,00024</b>	0	0,36
	15	0,9824	0,9132	0,4748	0,04284	0,0951	<b>0,09497</b>	0,07738	<b>0,01744</b>	<b>0,00014</b>	0	0,136
	20	0,9876	0,936	0,473	0,04268	0,06836	<b>0,06832</b>	0,05574	<b>0,01247</b>	<b>0,0001</b>	0	0,061
	25	0,9903	0,9493	0,4719	0,04258	0,05337	<b>0,05334</b>	0,04356	<b>0,0097</b>	<b>0,000079</b>	0	0,056
	30	0,992	0,958	0,4712	0,04252	0,04379	<b>0,04376</b>	0,03576	<b>0,00794</b>	<b>0,000065</b>	0	0,055
$R_s$	5	0,8875	0,6646	0,3688	0,04439	0,50455	<b>0,45896</b>	0,382	<b>0,05195</b>	<b>0,00075</b>	<b>0,02429</b>	9,03
	10	0,9495	0,8474	0,4145	0,04393	0,18008	<b>0,17256</b>	0,127	<b>0,02182</b>	<b>0,00025</b>	<b>0,02348</b>	4,17
	15	0,9644	0,8976	0,4313	0,04353	0,1141	<b>0,1108</b>	0,07738	<b>0,01439</b>	<b>0,00015</b>	<b>0,01885</b>	2,91
	20	0,9725	0,9225	0,4402	0,04327	0,084	<b>0,0821</b>	0,05574	<b>0,0108</b>	<b>0,000104</b>	<b>0,01545</b>	2,28
	25	0,9775	0,9376	0,4456	0,04309	0,06655	<b>0,06532</b>	0,04356	<b>0,00865</b>	<b>0,000081</b>	<b>0,01303</b>	1,84
	30	0,981	0,9477	0,4492	0,04296	0,05514	<b>0,05427</b>	0,03576	<b>0,00722</b>	<b>0,000066</b>	<b>0,01123</b>	1,57

На рисунку 5.18 подано залежності ККД від параметра  $k_{sc} = P_{SC}/P_{usf}$  для трьох значень опору нульового проводу, а також залежність максимально можливого ККД від зазначеного параметра, побудовану за (2.34).

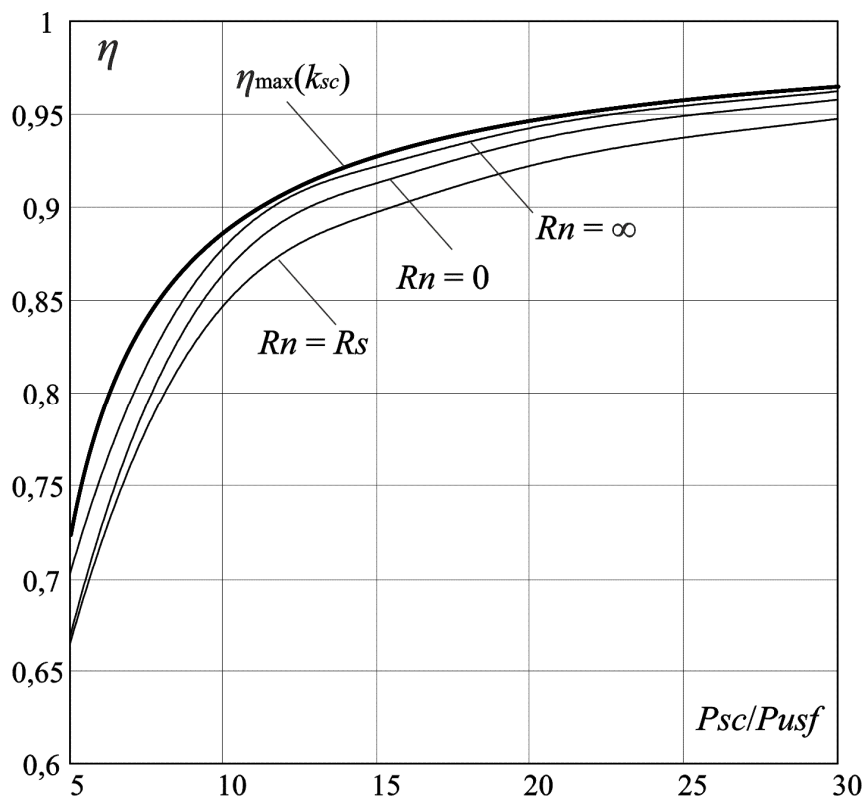


Рисунок 5.18 – Залежності ККД від параметра  $k_{sc} = P_{SC}/P_{usf}$

Аналіз кривих доводить, що компенсація додаткових складових потужності втрат для даної СЕ з невеликими значеннями відношення потужності резистивного короткого замикання до корисної потужності навантаження ( $5 < k_{sc} < 10$ ) уможливить збільшення ККД більш ніж на 5 %.

#### 5.3.4 Перевірка переходу від реактивної потужності до потужності втрат у трифазних системах електропостачання

Тотожність зв'язку реактивної потужності й потужності втрат можна довести за допомогою імітаційного моделювання з використанням Matlab-моделі відповідно до рисунка 5.12.

Зазвичай реактивну потужність ототожнюють з коливаннями енергії електромагнітного поля – енергетичним процесом обміну енергією між реактивними елементами ланцюга й джерелом енергії. У синусоїдальних режимах такий процес супроводжується зсувом між кривими миттєвих напруг і струмів. У нелінійних колах у разі активного характеру

навантаження можлива також поява кута зсуву між основними гармоніками напруги й струму, що свідчить про наявність реактивної потужності. У трифазних несиметричних системах з резистивним навантаженнями реактивна потужність може виникати навіть у синусоїдальних режимах. Подібні приклади спричиняють суперечності щодо пояснення фізичної природи реактивної потужності і провокують багатьох дослідників відмовитися від використання терміна «реактивна потужність», замінивши його нейтральним терміном «неактивна потужність».

Відповідно до положень сучасної теорії потужності поява розрахункової реактивної потужності трифазного СЕ пов'язана з наявністю кута зсуву між узагальненими просторовими векторами струму й напруги:

$$\varphi = \arccos \left( \frac{\vec{u}_{sa}}{|\vec{u}_s|} \cdot \frac{\vec{i}_{sa}}{|\vec{i}_s|} + \frac{\vec{u}_{sb}}{|\vec{u}_s|} \cdot \frac{\vec{i}_{sb}}{|\vec{i}_s|} + \frac{\vec{u}_{sc}}{|\vec{u}_s|} \cdot \frac{\vec{i}_{sc}}{|\vec{i}_s|} \right) \neq 0. \quad (5.45)$$

У разі дотримання цієї умови в СЕ виникає миттєва реактивна потужність, яку можна розрахувати за співвідношенням (2.15), використовуючи інформацію, що надходить із давачів напруги, встановлених на затискачах трифазного джерела й давачів струму лінії (див. рис. 5.6). Розміщення давачів напруги на початку лінії живлення дає змогу уникнути методичної помилки розрахування реактивної потужності, обумовленої протіканням реактивних струмів.

Окрім миттєвої реактивної потужності додатковим фактором, що впливає на виникнення втрат енергії, є пульсації миттєвої активної потужності, поява яких пов'язана як з асиметрією фазних напруг і навантажень, так і з наявністю вищих гармонійних складових у кривих напруг і струмів трифазної системи. Змінну складову миттєвої активної потужності можна розрахувати за допомогою скалярного добутку узагальнених просторових векторів напруги та струму:

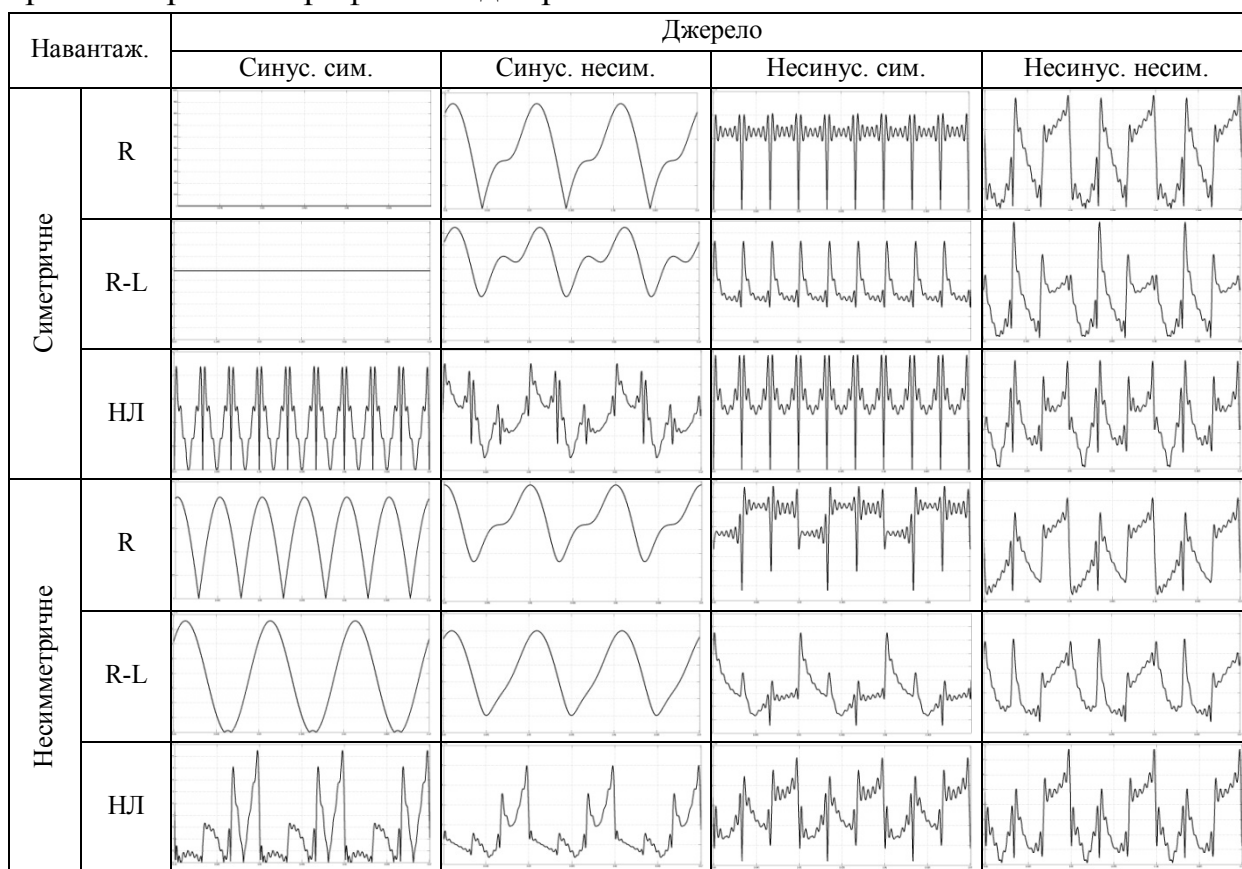
$$p_{puls} = p - P = |\vec{u}_s| \cdot |\vec{i}_s| \cdot \cos \varphi - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} |\vec{u}_s| \cdot |\vec{i}_s| \cdot \cos \varphi dt. \quad (5.46)$$

У таблиці 5.15 подано криві миттєвої реактивної потужності, що відповідають можливим поєднанням характеристик і режимів роботи трифазного джерела й навантаження, отриманим за допомогою імітаційної моделі для трифазної трипровідної СЕ з односпрямованим потоком енергії в лінії.

Дані таблиці доводять, що миттєва реактивна потужність відсутня в трифазній СЕ тільки в симетричному режимі з чисто резистивним навантаженням. У симетричному режимі трифазної СЕ з активно-реактивним навантаженням у кривій миттєвої реактивної потужності відсутня змінна складова. У всіх інших режимах миттєва реактивна потужність змінюється за періодичним законом, тобто з'являється можливість перейти від миттєвих до інтегральних значень під час її розрахування.

Зі співвідношення (3.63) зрозуміло, що потужність втрат, обумовлена миттєвою реактивною потужністю, прямо пропорційна квадрату середньоквадратичного значення реактивної потужності, обчисленому в періоді повторюваності  $T$ , однак різний характер появи реактивної потужності, що описується варіантами таблиці 5.15, не вказує на еквівалентність розрахунків за (3.63) для всіх можливих випадків.

Таблиця 5.15 – Криві миттєвої реактивної потужності, що відповідають можливим варіантам співвідношення характеристик і режимів роботи трифазного джерела і навантаження



Найпростішим способом доведення однозначності відповідності реактивної потужності потужності втрат у будь-яких режимах СЕ є

комп'ютерне моделювання з використанням розробленої Matlab-моделі (рис. 5.12). Для виключення впливу інших причин виникнення втрат у трифазній СЕ в моделі використаний блок SAF, що відіграє роль ідеального паралельного силового активного фільтра. Система управління SAF Controller виділяє складові миттєвої потужності й відфільтровує миттєву реактивну потужність. Як наслідок, сумарні втрати в трифазній СЕ містять дві складові: мінімально можливу потужність втрат і потужність втрат, обумовлену реактивною потужністю, які можна визначити за співвідношеннями (2.39) і (3.63) відповідно.

Моделювання проводили за такими параметрами еквівалентної схеми:  $P_{usf} = \text{const} = 400,1 \text{ kW}$ ;  $U_m = 311,13 \text{ V}$ ;  $f_s = 50 \text{ Hz}$ ;  $R_s = 0,01815 \Omega$ ;  $R_{load} = 0,3256 \Omega$ ;  $k_{sc} = 20$ .

Результати комп'ютерного моделювання подані в таблиці 5.16.

Таблиця 5.16 – Результати комп'ютерного моделювання

$k_{sc}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$\Delta P_{\min}^*$	$\Delta P_Q^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$
Симетричне R-L-навантаження						
20	0,943	0,2906	0,05574	0,004708	0,06046	0,06046
Асиметричне резистивне навантаження						
20	0,943	0,2906	0,05574	0,004708	0,06046	0,06046
Асиметричне резистивне навантаження (чотирипровідна СЕ)						
20	0,943	0,2906	0,05574	0,004708	0,06046	0,06046
Нелінійне симетричне навантаження						
20	0,943	0,2906	0,05574	0,004708	0,06046	0,06046
Нелінійне симетричне навантаження (чотирипровідна СЕ)						
20	0,943	0,2906	0,05574	0,004708	0,06046	0,06046
Асиметричне R-L-навантаження						
20	0,943	0,2906	0,05574	0,004708	0,06046	0,06046
Асиметричне R-L-навантаження (чотирипровідна СЕ)						
20	0,943	0,2906	0,05574	0,004708	0,06046	0,06046
Змішане R-L- і нелінійне навантаження						
20	0,943	0,2906	0,05574	0,004708	0,06046	0,06046
Змішане R-L- і нелінійне навантаження (чотирипровідна СЕ)						
20	0,943	0,2906	0,05574	0,004708	0,06046	0,06046

Прийнято такі позначення:  $\Delta P_{1\Sigma}^*$  – відносна сумарна потужність втрат, розрахована традиційним способом;  $\Delta P_{2\Sigma}^*$  – відносна сумарна потужність втрат, розрахована з використанням реактивної потужності. Порівнявши результати, подані в таблиці 5.16, можна зробити висновок про те, що значення потужності втрат від наявності в трифазній СЕ

реактивної потужності при незмінному значенні середньої активної потужності навантаження однакові для різних режимів роботи СЕ і різних способів виникнення реактивної потужності.

### 5.3.5 Перевірка уточненого співвідношення для розрахування сумарної потужності втрат як суми п'яти складових

Отримані в підрозділі 3.3.4 уточнені співвідношення для розрахування сумарної потужності втрат перевірили за допомогою Matlab-моделі трифазної СЕ. Перевіремо співвідношення (3.74) за прийнятими коефіцієнтами асиметрії резистивного навантаження  $k_{la} = 1$ ,  $k_{lb} = 1,3$ ,  $k_{lc} = 0,5568$  (відповідно до (5.13)). Результати співставлення розрахунку і експерименту наведено в таблиці 5.17. Як зрозуміло, використання співвідношення (3.74) дало змогу зменшити похибку розрахунку потужності сумарних втрат від 1,35 % до 0,2 %.

Таблиця 5.17 – Співставлення результатів розрахування й моделювання

Формула для розрахування $\Delta P_{\Sigma^*}$	Режим роботи СЕ											
	Трифазна трипровідна, $R_n = \infty$						Трифазна чотирипровідна, $R_n = R_s$					
	Симетричне джерело			Асиметричне джерело			Симетричне джерело			Асиметричне джерело		
	Резистивне асиметричне навантаження			Резистивне симетричне навантаження			Резистивне асиметричне навантаження			Резистивне симетричне навантаження		
	Розр,	Експ,	$\delta$ , %	Розр,	Експ,	$\delta$ , %	Розр,	Експ,	$\delta$ , %	Розр,	Експ,	$\delta$ , %
(3.66)	0,05864	0,05865	0,016	0,0644	0,0588	9,5	0,0703	0,07126	1,354	0,06682	0,06243	7,03
(3.74)				0,0585	0,0588	0,51	0,07112	0,07126	0,2	0,06221	0,06243	0,352
(3.88)				0,05846	0,0588	0,578						
(3.95)										0,0637	0,06243	2,034

Результати розрахування за уточненим співвідношенням (3.74) у несиметричному режимі роботи трифазного джерела в трипровідній СЕ і результати експерименту на моделі за прийнятими амплітудними коефіцієнтами  $k_a = 1$ ,  $k_b = 1,3$ ,  $k_c = 0,5568$  (відповідно до (5.13)), співставлено в таблиці 5.17. Використання співвідношення (3.74) для визначення сумарної потужності втрат дало змогу зменшити похибку розрахунку від 9,5 % до 0,51 %.

Результати розрахування за уточненим співвідношенням (3.74) у несиметричному режимі роботи трифазного джерела в чотирипровідній СЕ і результати експерименту на моделі за прийнятими амплітудними коефіцієнтами  $k_a = 1$ ,  $k_b = 1,3$ ,  $k_c = 0,5568$  (відповідно до (5.13)),

співставлено в таблиці 5.17. Використання співвідношення (3.74) для визначення сумарної потужності втрат дало змогу зменшити похибку розрахування від 7 % до 0,35 %.

У цій самій таблиці наведено результати розрахування за наближеними формулами (3.88) і (3.95), які засвідчують їхню достатню точність.

### 5.3.6 Резерв підвищення коефіцієнта корисної дії трифазної системи електропостачання при підімкненні силового активного фільтра.

Розрахування складових потужності втрат у двох системах

Економічна ефективність підімкнення САФ з погляду зменшення потужності втрат у СЕ досягається за умови, що сумарна потужність втрат у СЕ після підімкнення компенсатора буде меншою, ніж до його підімкнення:

$$\Delta P_{on*} < \Delta P_{\Sigma*}. \quad (5.47)$$

Якщо після підімкнення САФ корисна потужність навантаження залишиться незмінною, то нерівність (5.47) можна подати так:

$$\Delta P_{c*} + \Delta P_{saf*} < \Delta P_{add*}, \quad (5.48)$$

де  $\Delta P_{c*}$  – потужність втрат, необхідна для підтримання напруги на конденсаторі ланки постійного струму САФ вище амплітудного значення мережевої напруги;  $\Delta P_{saf*}$  – потужність втрат силового компенсатора.

Визначимо максимально можливий ефект підвищення ККД, прийнявши компенсатор за ідеальне джерело струму, а корисну потужність незмінною до і після підімкнення САФ. Для цього скористаємось Matlab-моделлю еквівалентної схеми трифазної СЕ з САФ (рис. 5.12), що за своїми характеристиками відповідає рисунку 2.4. Для моделювання було обрано трифазну чотирипровідну СЕ з симетричним трифазним джерелом напруги при  $R_n = R_s$ . Параметри елементів моделі:  $k_{sc} = 5-30$ ;  $U_m = 311,13$  В;  $f_s = 50$  Гц;  $P_{usf} = \text{const} = 400,1$  кВт.

Як приклад, розглянемо три окремі фактори виникнення додаткових втрат у СЕ:

1. Симетричне активно-реактивне навантаження. Прийmemo, що  $\varphi = 20^\circ$ .

2. Асиметричне резистивне навантаження. Прийmemo, що активні опори трьох фаз навантаження відповідають співвідношенням (5.41) і закономірності (5.13) при  $k_a = 1$ ,  $k_b = 1,3$ ,  $k_c = 0,5568$ .

3. Симетричне нелінійне навантаження. Прийmemo, що фазні струми навантаження відповідають співвідношенню (5.42).

Для узагальнення результатів моделювання було прийнято шість режимів роботи СЕ, що відповідають поєднанню трьох зазначених факторів:

- режим 1 – симетричне активно-реактивне навантаження;
- режим 2 – асиметричне резистивне навантаження;
- режим 3 – симетричне нелінійне навантаження;
- режим 4 – асиметричне активно-реактивне навантаження;
- режим 5 – симетричне змішане (активно-індуктивне й нелінійне) навантаження;
- режим 6 – асиметричне нелінійне навантаження.

За допомогою комп'ютерної моделі було розраховано складові сумарної потужності втрат за універсальною формулою (3.66) та в рqt-координатах (3.108). Результати розрахування для шести прийнятих режимів у відсотках від сумарної потужності втрат зведено в таблицю 5.18.

Із таблиці зрозуміло, що в розглянутих режимах найбільшу частку сумарної потужності втрат становлять дві складові: потужність додаткових втрат, обумовлювана миттєвою реактивною потужністю, і потужність додаткових втрат, обумовлювана протіканням струму в нульовому проводі.

На рисунку 5.19 показано резерв підвищення ККД для розглянутих шести режимів роботи СЕ: площа зони підвищення ККД, позначена на рисунку темним кольором, відповідає вигіднішим техніко-економічним умовам для використання САФ. Економічна доцільність використання САФ збільшується для СЕ, де одночасно можуть бути наявними декілька факторів, що спричиняють появу додаткових втрат електричної енергії. Прикладом таких СЕ можуть слугувати міські комунальні мережі на рівні окремих споживачів або груп споживачів.

#### **5.4 Моделювання систем електропостачання рухомого складу метрополітену**

Для перевірки теоретичних положень розрахування показників енергетичної ефективності СЕ метрополітену, отриманих у підрозділі 4.1, розроблено еквівалентну Matlab-модель систем електропостачання рухомого складу метрополітену, подану на рисунку 5.20. Модель дає змогу отримати енергетичні характеристики п'яти розглянутих систем електропостачання в динамічному режимі.



Таблиця 5.18 – Результати визначення складових сумарної потужності втрат

$k_{sc}$	$\Delta P_{\Sigma}^*$	Складові сумарної потужності втрат за універсальною формулою (3.66), %					У координатах pqr (3.108), %		
		$\Delta P_{min}^*/\Delta P_{\Sigma}^*$	$\Delta P_q^*/\Delta P_{\Sigma}^*$	$\Delta P_{puls}^*/\Delta P_{\Sigma}^*$	$\Delta P_n^*/\Delta P_{\Sigma}^*$	$\Delta P_{mut}^*/\Delta P_{\Sigma}^*$	$\Delta P_p^*/\Delta P_{\Sigma}^*$	$\Delta P_q^*/\Delta P_{\Sigma}^*$	$\Delta P_r^*/\Delta P_{\Sigma}^*$
Режим 1									
5	0,4792	79,71	16,60	0	0	3,72	91,32	0	8,69
10	0,1514	83,89	15,79	0	0	0,00	87,58	0	12,43
15	0,09199	84,12	15,75	0	0	0,00	86,43	0	13,57
20	0,0662	84,18	15,74	0	0	0,00	85,89	0	14,12
25	0,05172	84,22	15,72	0	0	0,00	85,56	0	14,44
30	0,04245	84,24	15,71	0	0	0,00	85,35	0	14,65
Режим 2									
5	0,4465	85,55	4,32	2,64	2,64	4,87	95,10	3,52	1,38
10	0,1559	81,47	5,89	2,67	7,58	2,41	87,81	10,10	2,10
15	0,09752	79,35	6,44	2,65	9,81	1,73	84,64	13,07	2,28
20	0,07126	78,20	6,74	2,63	11,06	1,35	82,89	14,75	2,36
25	0,05621	77,50	6,92	2,62	11,85	1,11	81,64	15,79	2,40
30	0,04644	77,00	7,04	2,61	12,39	0,94	81,05	16,52	2,43
Режим 3									
5	0,5046	75,70	10,29	0,15	4,81	9,06	89,79	6,41	3,79
10	0,1801	70,53	12,12	0,14	13,04	4,19	77,40	17,39	5,19
15	0,1141	67,82	12,62	0,13	16,52	2,94	72,65	22,02	5,37
20	0,084	66,34	12,86	0,12	18,39	2,27	70,07	24,51	5,40
25	0,06655	65,46	12,99	0,12	19,58	1,84	68,50	26,07	5,41
30	0,05514	64,85	13,10	0,12	20,37	1,55	67,43	27,20	5,41
Режим 4									
5	0,6077	62,85	23,33	1,87	1,74	10,21	86,05	2,32	11,64
10	0,1902	66,78	22,13	2,05	6,47	2,55	76,08	8,63	15,27
15	0,1185	65,30	22,26	2,00	8,67	1,71	72,11	11,55	16,30
20	0,08644	64,47	22,32	1,97	9,92	1,31	70,06	13,22	16,72
25	0,06816	63,91	22,36	1,95	10,72	1,07	68,76	14,29	16,96
30	0,0563	63,52	22,38	1,93	11,27	0,89	67,87	15,03	17,10
Режим 5									
5	0,5046	75,70	9,45	1,05	4,81	9,00	90,25	6,41	3,35
10	0,1801	70,53	11,35	0,96	13,04	4,14	78,01	17,39	4,59
15	0,1141	67,82	11,89	0,91	16,52	2,89	73,27	22,02	4,74
20	0,084	66,34	12,15	0,88	18,39	2,22	70,70	24,51	4,77
25	0,06655	65,46	12,31	0,86	19,58	1,79	69,12	26,09	4,78
30	0,05514	64,85	12,42	0,84	20,37	1,50	68,04	27,20	4,78
Режим 6									
5	0,5663	67,45	11,07	3,53	5,72	12,24	88,49	7,62	3,89
10	0,2	63,51	13,10	2,87	15,42	5,09	74,25	20,56	5,17
15	0,1266	61,12	13,61	2,58	19,23	3,47	69,07	25,63	5,32
20	0,0931	59,86	13,85	2,44	21,21	2,64	66,36	28,27	5,35
25	0,0737	59,11	13,98	2,35	22,43	2,13	64,74	29,88	5,36
30	0,06102	58,60	14,07	2,29	23,24	1,78	63,63	30,99	5,37

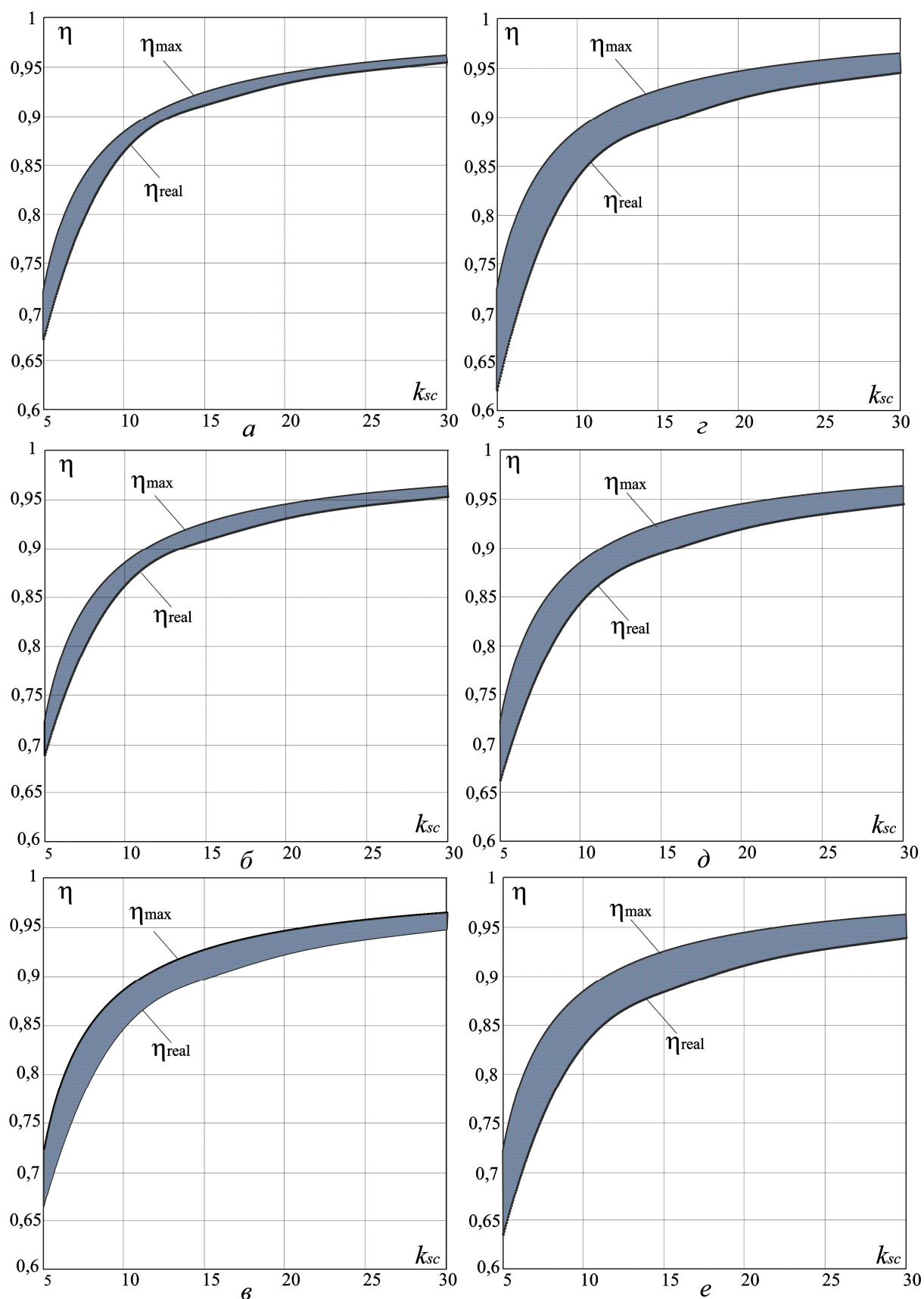


Рисунок 5.19 – Резерв підвищення ККД трифазного чотирипровідної СЕ:  
 $a$  – у режимі 1;  $б$  – у режимі 2;  $в$  – у режимі 3;  $г$  – у режимі 4;  
 $д$  – у режимі 5;  $e$  – у режимі 6

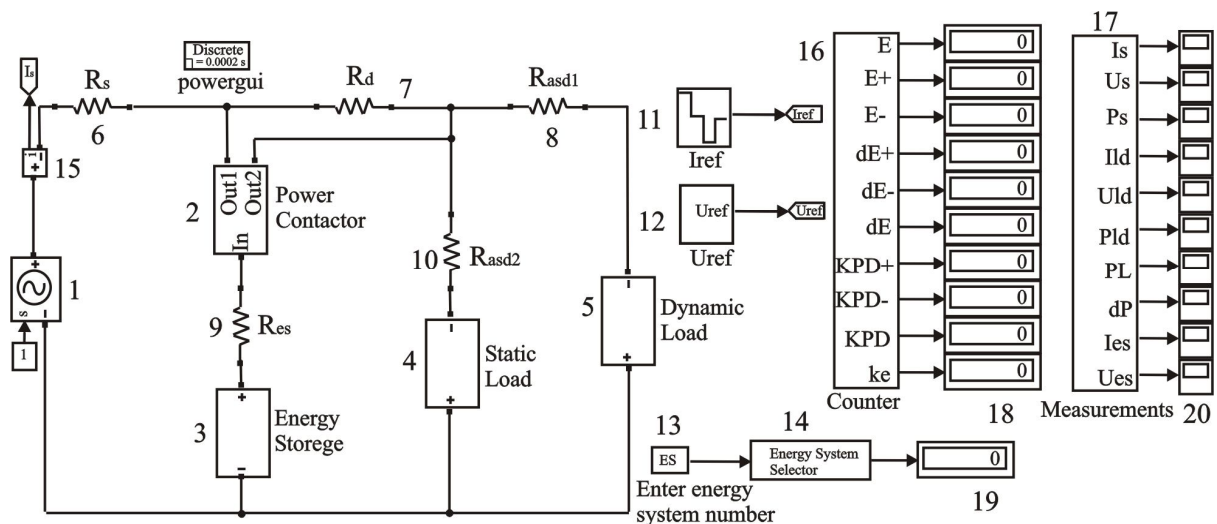


Рисунок 5.20 – Matlab-модель систем електропостачання рухомого складу метрополітену

Matlab-модель на рисунку 5.20 складається з чотирьох типів блоків:

1. Силова схема (1–10).
2. Блоки завдання параметрів (11–14).
3. Вимірювальні блоки й підсистеми (15–17).
4. Віртуальні прилади реєстрації вимірюваних сигналів (18–20).

Силовая схема еквівалентної Matlab-моделі складається з таких елементів:

- джерела напруги (блок 1), що імітує промислову мережу;
- статичного навантаження (блок 4), виконаного у вигляді джерела струму, що імітує допоміжне електротехнічне обладнання електропоїзда;
- динамічного навантаження (блок 5), виконаного у вигляді джерела струму, що імітує електропривод рухомого складу. Цей блок дає змогу задати будь-яку форму графіка потужності;
- накопичувача енергії (блок 3);
- силових контакторів (блок 2), що виконують необхідні комутації силовій схемі залежно від обраної СЕ;
- резистивних навантажень (блоки 6–10), виконаних у вигляді стандартних блокових елементів Series RLC Load бібліотеки SimPowerSystems. Значення активної потужності розраховується математично залежно від обраної СЕ. Блоки резисторів визначають втрати в елементах системи електропостачання (рис. 5.20).

Блоки завдання параметрів 11 і 12 дають змогу задати форму графіка струму й напруги динамічного навантаження. У цій моделі за допомогою таких блоків задаються миттєві значення струму й напруги двигуна постійного струму. Блоки 13 і 14 дають змогу обрати досліджувану

систему електропостачання шляхом зазначення відповідного порядкового номера СЕ у властивостях моделі.

Вимірювальна підсистема (блок 16) реалізує функції цифрового лічильника (рис. 5.21–5.24), у вихідні порти якого надходить інформація про поточні значення вимірюваних параметрів, що реєструються дисплеями (блоки 18). Миттєві значення струмів, напруг і потужностей силової схеми розраховуються у вимірювальній підсистемі (блок 17) і реєструються блоками осцилографів (20).

Результати вимірювань показників ефективності п'яти СЕ подано в таблиці 4.1 в рядках «Е-т». Зіставляючи дані віртуального комп'ютерного експерименту з даними теоретичних розрахунків (рядки «Р-к» табл. 4.1.) можна стверджувати, що розроблена методика визначення ефективності систем електропостачання метрополітену коректна.

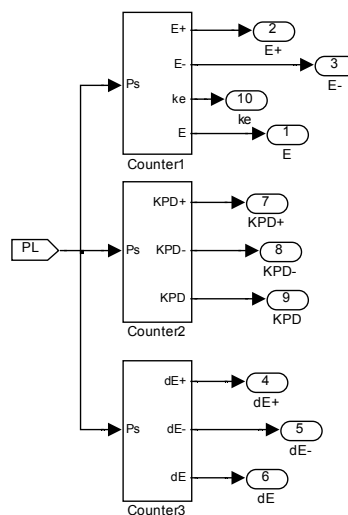


Рисунок 5.21 – Цифровий лічильник моделі

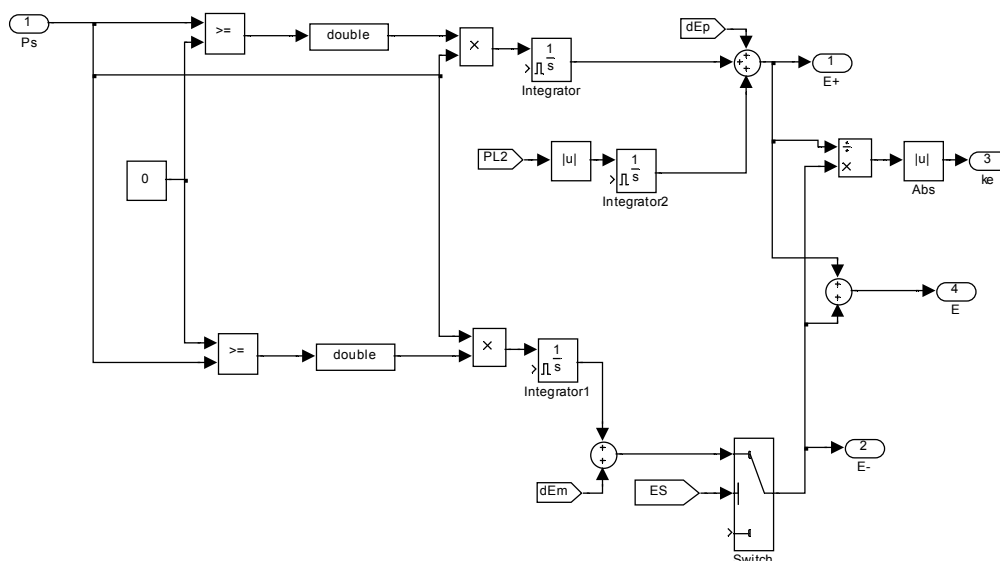


Рисунок 5.22 – Блок Counter1 цифрового лічильника

На рисунках 5.25–5.29 подано осцилограми потужності втрат в інтервалі руху для п'яти досліджуваних СЕ. Осцилограми демонструють зменшення потужності втрат при переході до наступної, енергоефективнішої СЕ.

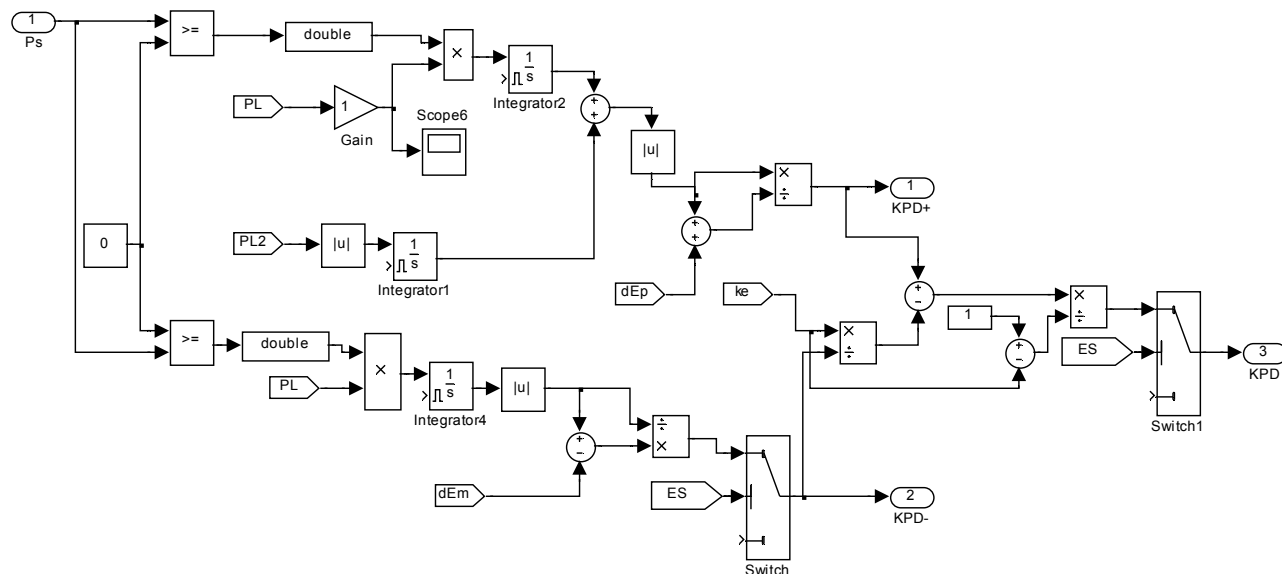


Рисунок 5.23 – Блок Counter2 цифрового лічильника

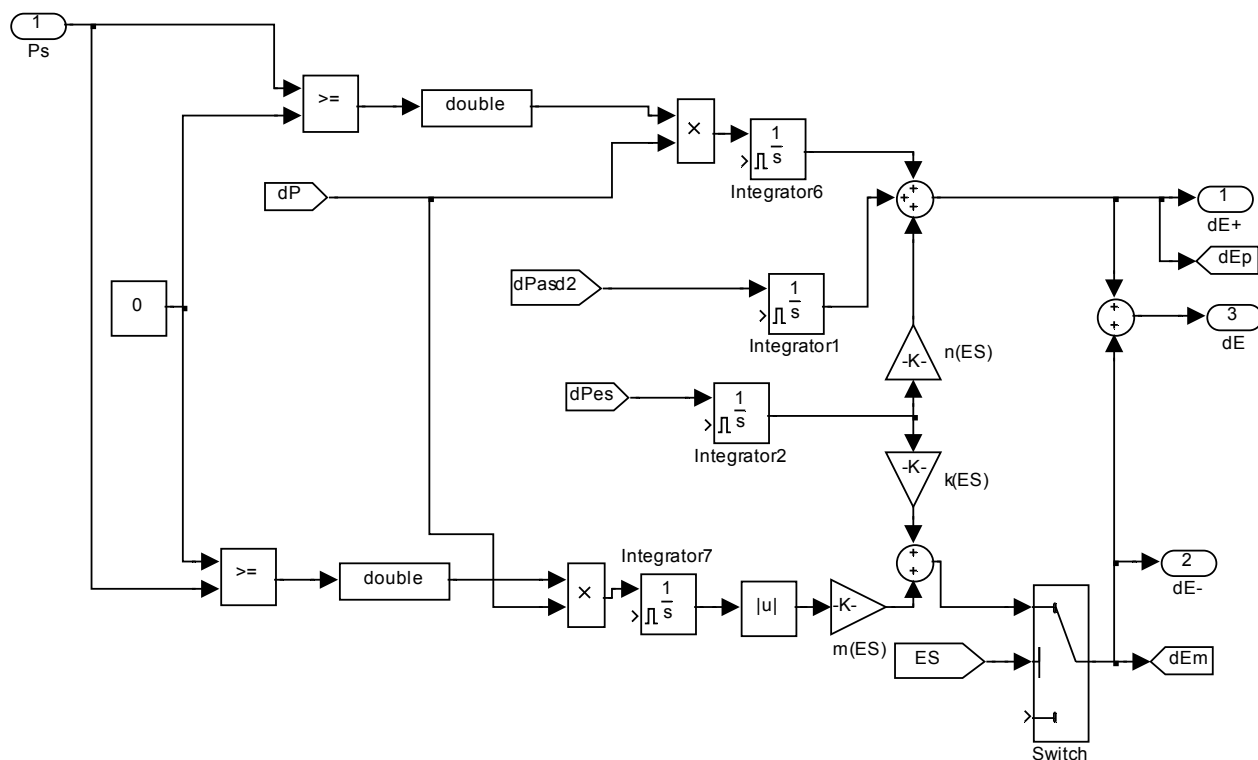


Рисунок 5.24 – Блок Counter3 цифрового лічильника

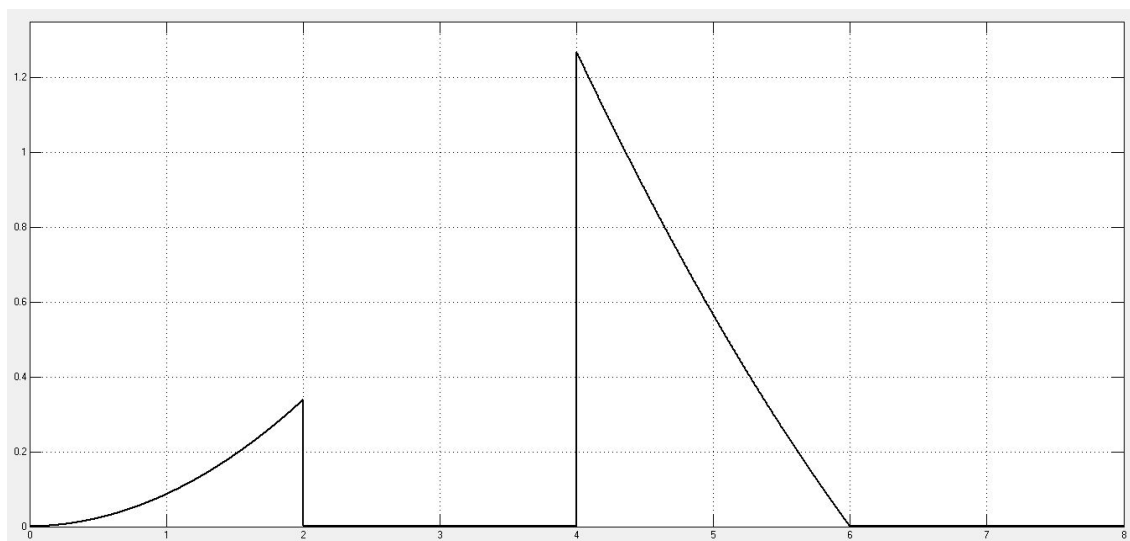


Рисунок 5.25 – Відносна потужність втрат в інтервалі руху для СЕ 1

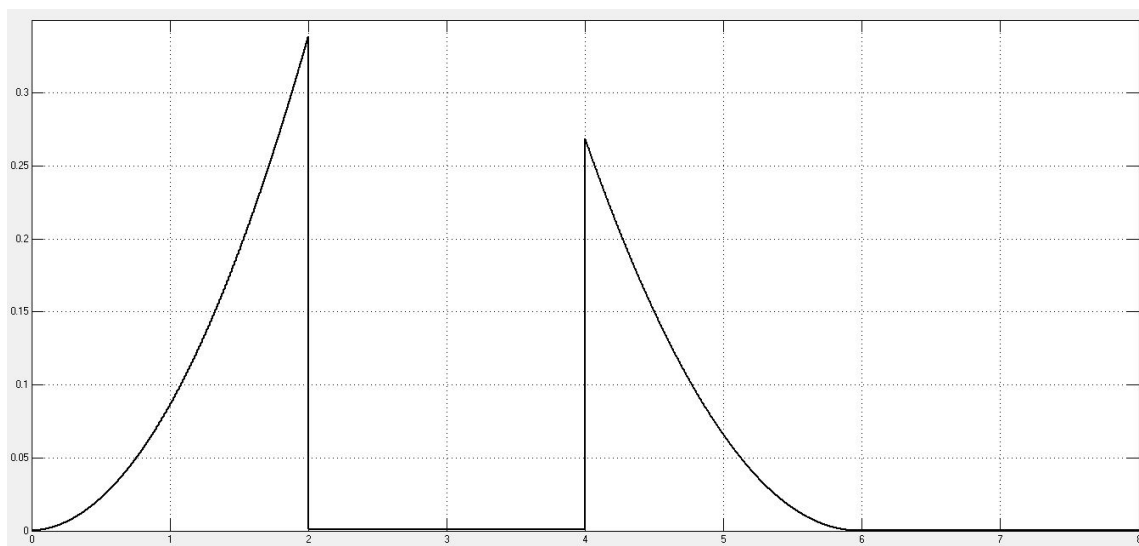


Рисунок 5.26 – Відносна потужність втрат в інтервалі руху для СЕ 2

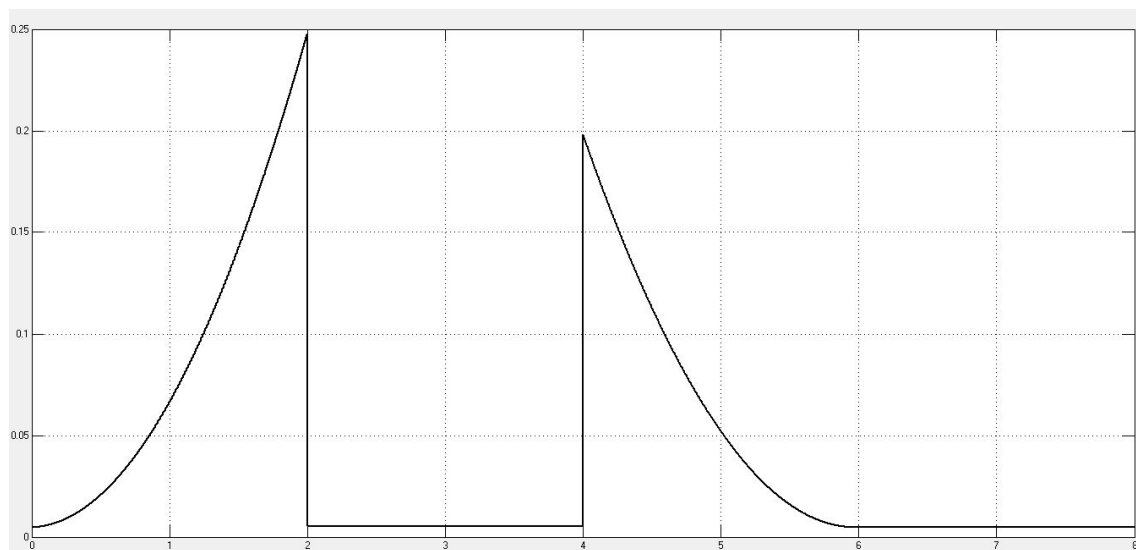


Рисунок 5.27 – Відносна потужність втрат в інтервалі руху для СЕ 3

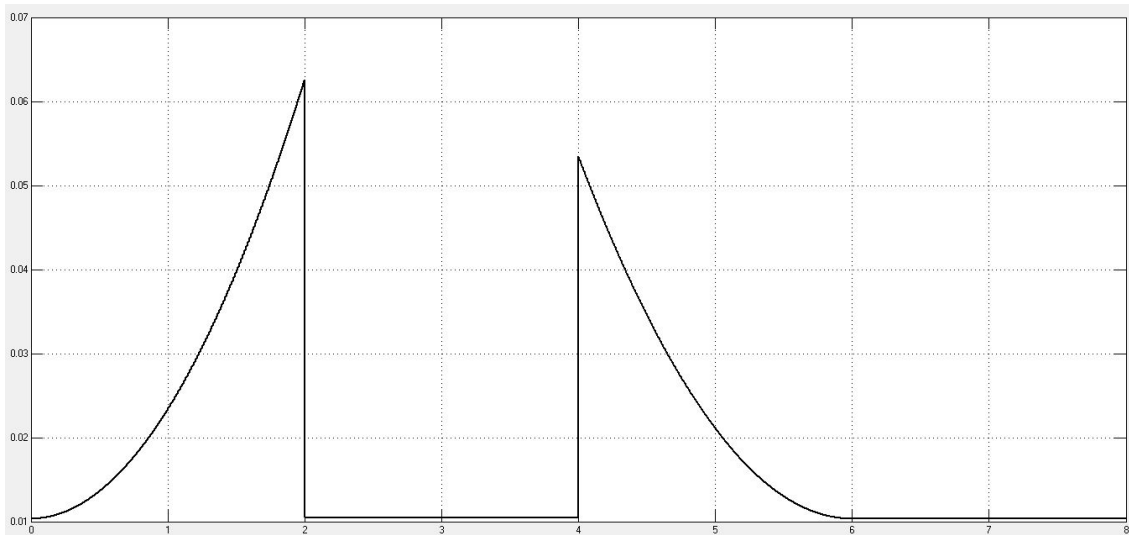


Рисунок 5.28 – Відносна потужність втрат в інтервалі руху для СЕ 4

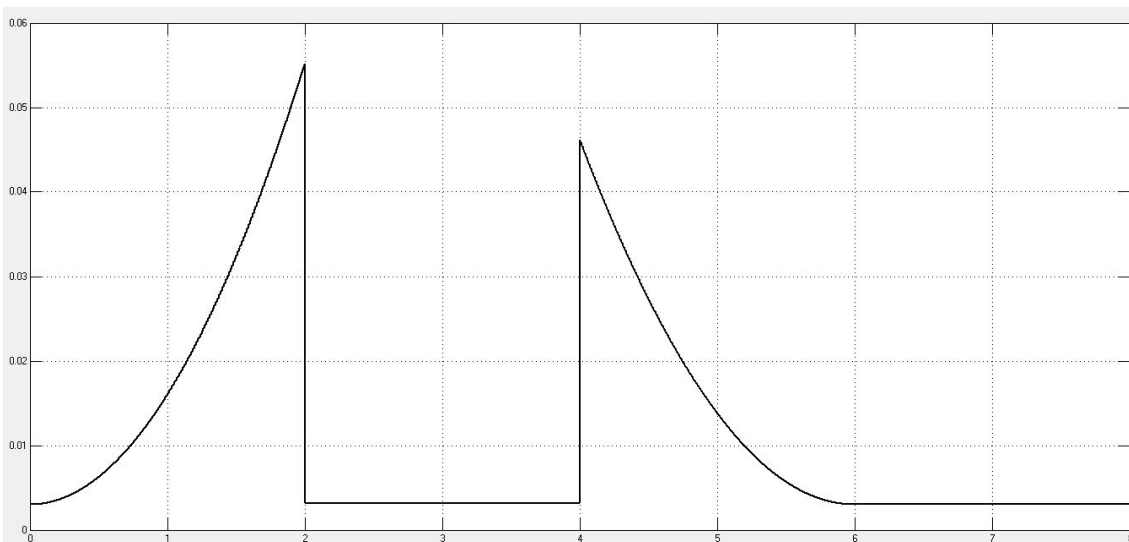


Рисунок 5.29 – Відносна потужність втрат в інтервалі руху для СЕ 5

### 5.5 Верифікація розрахування елементів і якісних показників роботи системи електропостачання з паралельним силовим активним фільтром

У підрозділі наведено приклад налагодження Matlab-моделі СЕ з САФ шляхом змінювання параметрів. Доведено можливість отримання майже синусоїдального струму лінії з коефіцієнтом нелінійних спотворень (THD), меншим 5 % за виконання інших вимог, сформульованих у технічному завданні.

Сучасний рівень розвитку засобів об'єктного моделювання дає змогу перед початком виробництва й лабораторних випробувань нового виробу верифікувати його роботу за запропонованою функціональною або

принциповою схемою й розрахованими параметрами елементів. До того ж, як показала практика, отримані в моделі результати з високим ступенем точності збігаються з результатами, отриманими на фізичному зразку. Ступінь наближення віртуальних і реальних результатів роботи об'єкта безпосередньо залежить від точності виданого технічного завдання й від бажаного ступеня деталізації моделі. Зрозуміло, що чим детальнішу модель бажає отримати розробник обладнання, тим складнішою вона буде, й тим більших обчислювальних витрат потребує її реалізація.

Сучасний пакет моделювання Matlab/Simulink/SimPowerSys дає змогу отримати максимально наближені до реальності результати моделювання схем силової електроніки за прийняттого рівня обчислювальних витрат. Отже, саме його було обрано розробником обладнання для перевірки коректності його роботи перед початком реалізації розрахованого об'єкта й відповідності вихідних параметрів наявним технічним умовам.

Як об'єкт моделювання, розробником обладнання запропоновано паралельний САФ, який призначений для мінімізації спотворень на вході СЕ, що містить АІН з ШІМ і ще два аналогічні некомпенсовані навантаження, підімкнені до шин тієї самої живлячої підстанції.

Структурну схему досліджуваного об'єкта наведено на рисунку 5.30.

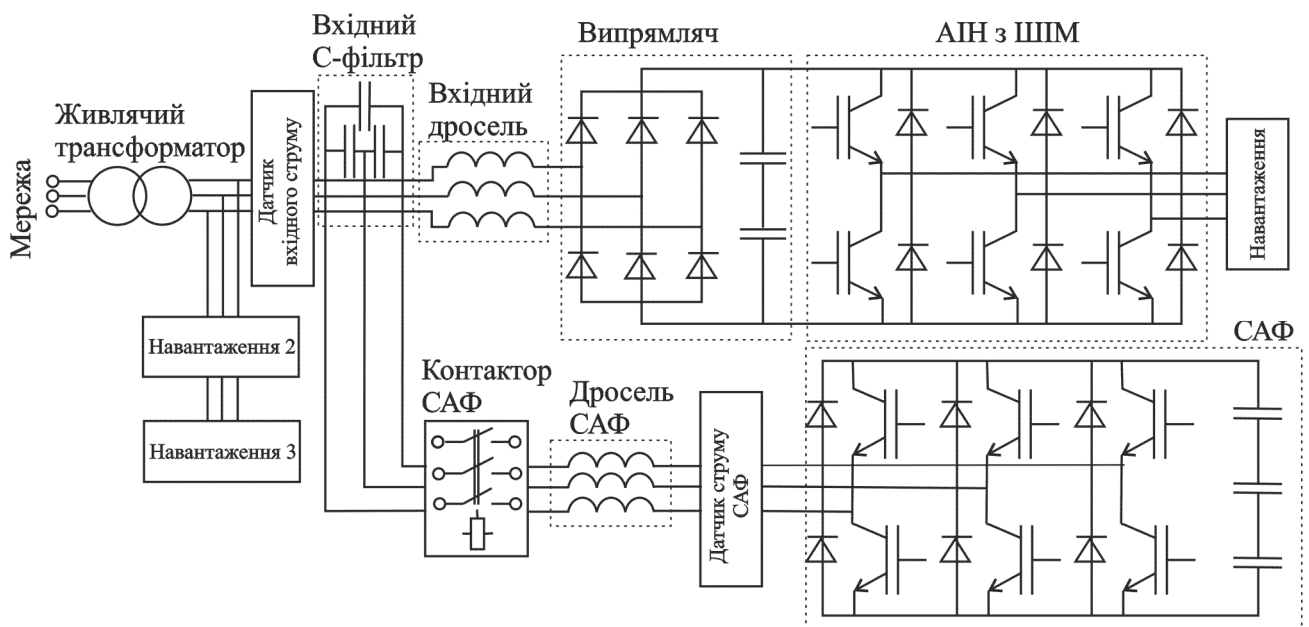


Рисунок 5.30 – Структурна схема об'єкту моделювання



Згідно з технічним завданням ця схема містить:

- трифазну живлячу мережу з лінійною напругою 6 кВ, частотою  $50 \pm 2$  Гц. Спотворення напруги мережі при вимкненому навантаженні не перевищує 5 %;

- живлячий трансформатор підстанції 6/0,4 кВ із номінальною потужністю 1 МВт і напругою короткого замикання  $e_K = 5,9$  % із з'єднанням первинних і вторинних обмоток у зірку без виведення нульового проводу. Передбачається можливість відхилення вихідної напруги живлячого трансформатора залежно від зовнішніх факторів у межах  $380 \pm 95$  В;

- вхідні конденсатори САФ мають розрахункову ємність 23 мкФ кожний і з'єднані в трикутник;

- вхідна індуктивність фази САФ – 150 мкГ; сумарна ємність ланки постійного струму САФ – 18 мФ; максимальний діючий вихідний струм САФ – 190 А;

- САФ працює з фіксованою частотою модуляції, яка визначається допустимим виділенням тепла на силових ключах. У разі використання силових модулів 12 класу частота ШІМ не повинна перевищувати 7 кГц, у разі використання модулів 17 класу – 4 кГц;

- розрахункова ємність ланки постійного струму АІН дорівнює 28 мФ; вхідна індуктивність фази АІН – 75 мкГн; номінальний струм ланки постійного струму АІН – 615 А, що відповідає номінальній потужності навантаження 300 кВт.

Визначеним завданням є створення в програмному середовищі Matlab/Simulink/SimPowerSys математичної моделі перетворювальної системи з наведеними вище параметрами, поданої на рисунку 5.31.

Окрім того, необхідно розробити алгоритм управління САФ, що забезпечує такі характеристики:

- $THD_I$  вхідного струму системи не повинен перевищувати 5 %;

- дослідити можливість зменшення: класу силових модулів САФ, частоти ШІМ САФ, індуктивності вхідних дроселів і ємності конденсатора ланки постійного струму САФ при строгому дотриманні попередньої умови:  $THD_I < 5$  %.

Ця модель відповідає параметрам якості споживаної електроенергії, заданої в технічному завданні. Однак для цього в топологію схеми СЕ рисунка 5.31 довелось внести деякі незначні корективи.

Приміром, вхідний конденсатор САФ було вилучино з кола мережі живлення і підімкнено за допомогою контактора САФ разом із силовим

активним фільтром, щоб уникнути можливих резонансних явищ з індуктивністю живлячого трансформатора й інших навантажень у разі відімкненого САФ.

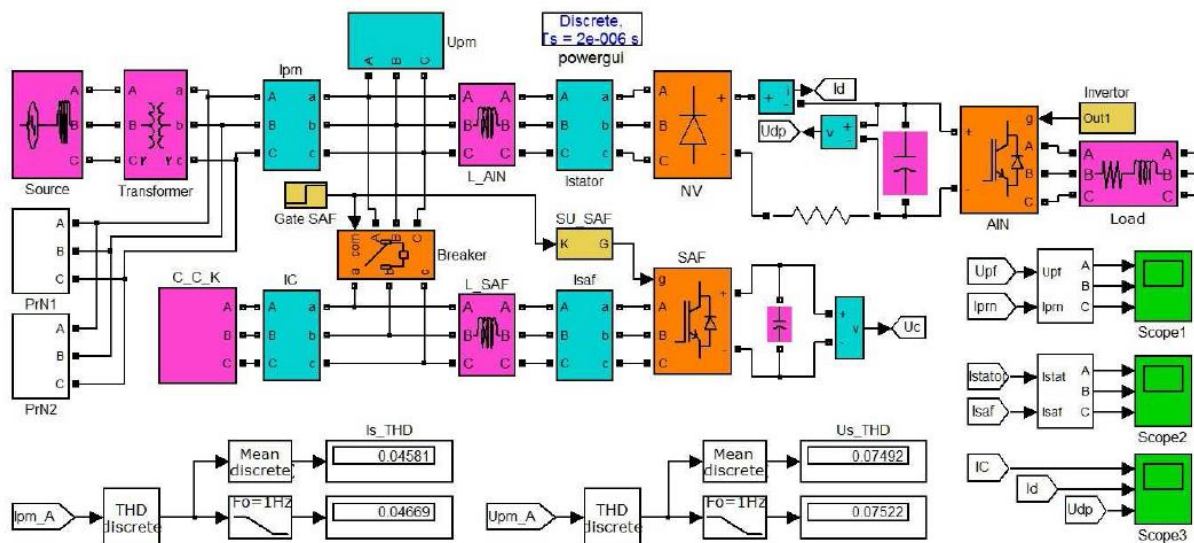


Рисунок 5.31 – Matlab-модель СЕ з САФ

Параметри деяких елементів схеми також було скориговано для досягнення результатів, що задовольняють технічне завдання. Розглянемо основні елементи моделі:

- мережа живлення моделюється трифазним симетричним джерелом змінної напруги Source 6 кВ і індуктивністю фази 20 мГн, що у поєднанні з параметрами живлячого трансформатора Transformer відповідає реальним умовам джерела живлення, зазначеним у технічному завданні;

- ємності входних конденсаторів САФ C\_C\_K довелося збільшити в два рази відносно розрахункової, і вони склали 46 мкФ кожна при з'єднанні в трикутник. Входну індуктивність фази САФ L\_SAF, навпаки, було зменшено в два рази відносно розрахункової, і вона склала 75 мГн. Сумарна ємність ланки постійного струму САФ залишилася на рівні розрахункової – 18 мФ. Максимальний діючий вихідний струм САФ не перевищує заданий у технічному завданні за будь-яких режимів роботи схеми;

- САФ працює з фіксованою частотою модуляції 6 кГц за умови підтримання постійної напруги на конденсаторі на рівні 770 В, що на практиці дає змогу використовувати силові модулі дванадцятого класу з істотним запасом за напругою;

- ємність ланки постійного струму AIN залишилася на рівні розрахункової – 28 мФ, а входні індуктивності фази AIN L\_AIN збільшені

вдвічі – 150 мкГн. Активний опір та індуктивність фази еквівалентного навантаження Load становлять 0,25 Ом і 1 мкГн відповідно, що забезпечує номінальний струм ланки постійного струму АІН 615 А і відповідає номінальній потужності навантаження 300 кВт за технічним завданням;

- інші навантаження – PrN1 і PrN2, підімкнені до виходу живлячого трансформатора паралельно до основного навантаження, схемно за своїми параметрами повністю повторюють основне навантаження у вигляді АІН із ШІМ;

- САФ підмикається паралельно до мережі живлення за допомогою трифазної контактної групи Breaker у момент часу, що задається блоком Gate SAF;

- силова схема Matlab-моделі включає блоки давачів, частина з яких (вхідного струму I<sub>prn</sub>, вхідної фазної напруги U<sub>prn</sub>, струму САФ I<sub>saf</sub> і напруги ланки постійного струму САФ U<sub>c</sub>) використовуються для роботи системи управління силовим активним фільтром SU\_SAF. Решта давачів використовується для виведення наочної інформації про роботу схеми на осцилографи Scope1-3.

Система управління САФ SU\_SAF виконана з використанням р-q-г теорії потужності. Її топологія й використовувані під час роботи математичні перетворення докладно описано в [42]. Така система управління ризниця низкою істотних переваг, що забезпечує її успішне застосування під час моделювання й створення різних типів силових активних фільтрів. Оскільки всі сигнали, що циркулюють у системі управління, подано у відносних одиницях, шляхом підбору відповідних масштабних коефіцієнтів можна легко домогтися її коректної роботи в широкому спектрі параметрів СЕ з САФ. Як базові величини, під час розрахування приймаються номінальний діючий струм і напруга живлення в мережі в точці підімкнення САФ.

Ще однією важливою перевагою такого типу системи управління є використання лише одного пропорційно-інтегрального регулятора – регулятора напруги на конденсаторі САФ, налаштування параметрів якого, на відміну від інших можливих систем управління, зазвичай особливих проблем не спричиняє.

Істотною відмінністю СУ САФ, застосованої в моделі на рисунку 5.31 [22], від СУ САФ, описаної в [42], є використання алгоритму формування керуючих імпульсів на силові ключі з фіксованою, заздалегідь заданою частотою модуляції. Це, на відміну від релейного алгоритму без фіксованої частоти модуляції [42], дає змогу точно оцінити можливість

застосування того чи іншого типу силових модулів на підставі їх частотних характеристик і допустимого тепловиділення. Однак це погіршує й ефективність роботи САФ, особливо за наявності крутих фронтів у струмі мережі, що компенсується, при малій індуктивності фази, тому вхідну індуктивність фази АІН в моделі було збільшено вдвічі щодо розрахункової.

Нижче наведено осцилограми, що характеризують якість роботи силового активного фільтра в модельованій системі електроживлення. На рисунку 5.32 зображено осцилограми вхідних струмів САФ і АІН, зняті з давачів фазних струмів  $I_{stator}$  та  $I_{saf}$ . Зрозуміло, що вхідний струм АІН має форму, характерну для шестипульсного мостового некерованого випрямляча, що працює на ємнісне навантаження.

На рисунку 5.33 наведено осцилограми скомпенсованих фазних струмів і напруг на вході СЕ з САФ, зняті з давачів  $I_{prn}$  і  $U_{prn}$ . З рисунка 5.33 зрозуміло, що фазні струм і напруга в точці підімкнення САФ мають фактично синусоїдальну форму й співпадають за фазою. Зрозуміло також, що найбільші перешкоди у фазному струмі виникають в інтервалах різкого змінювання вхідного струму АІН, що, як уже було зазначено вище, є недоліком алгоритму роботи САФ з фіксованою частотою модуляції в разі намагання її максимально зменшити, щоб здешевити використовувані силові модулі і їхні системи охолодження.

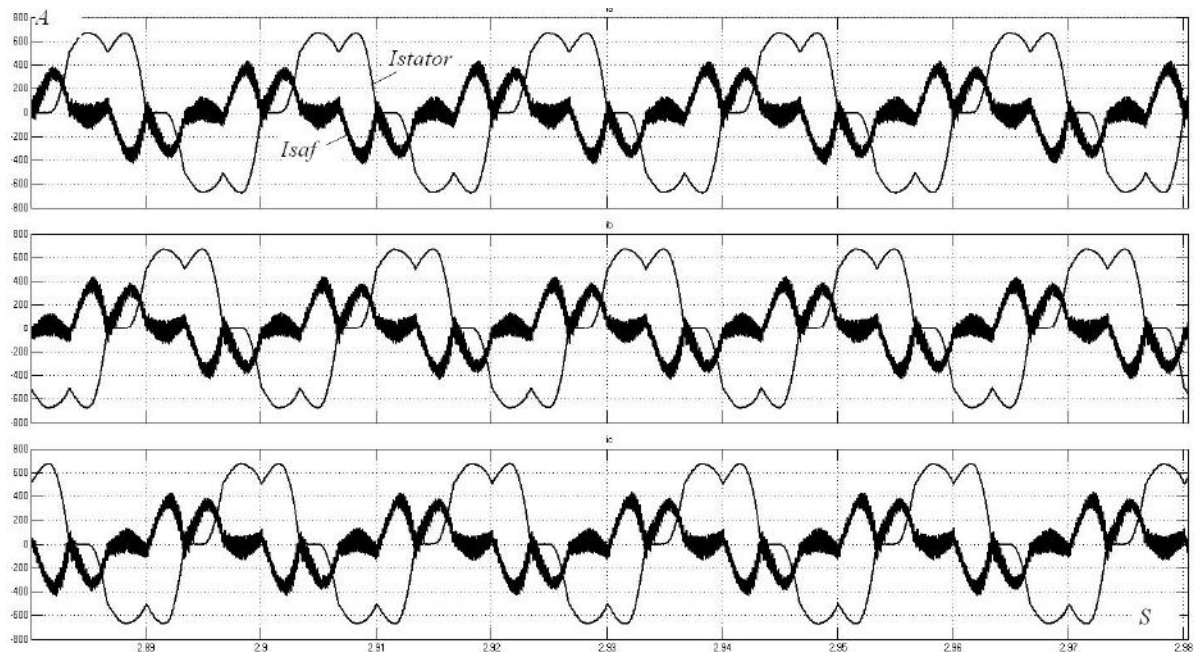


Рисунок 5.32 – Осцилограми вхідних струмів САФ і навантаження

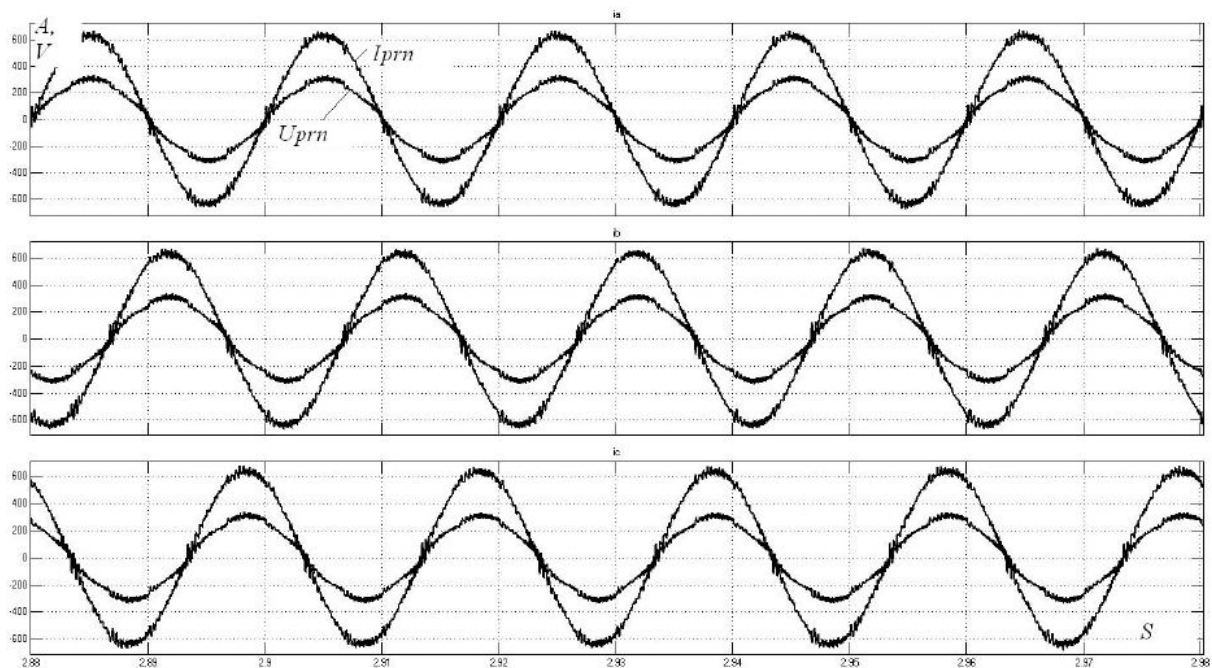


Рисунок 5.33 – Осцилограми мережєвих фазних напруг і струмів СЕ з САФ

Відповідно до результатів моделювання, така форма мережевого струму (рис. 5.33) має коефіцієнт THD, який є стабільним і міститься в межах 4,5–4,7 %, що відповідає умовам технічного завдання. Щобільше, у разі підвищення частоти модуляції до допустимої за завданням 7 кГц можна знизити THD струму мережі до 4–4,2 %.

THD фазної напруги перебуває на рівні 7,5 % і істотно знизити його у запропонованій за технічним завданням топології неможливо через синхронну роботу від загального джерела ще двох аналогічних, але не компенсованих автономних інверторів напруги такої самої потужності.

### Висновки за розділом 5

1. Запропоновано два способи створення математичної моделі трифазної СЕ: перший базується на векторній, а другий – на матричній формі подання енергетичних процесів у трифазних системах, що дає змогу вирішити проблему підтримання на постійному рівні значення середньої активної потужності навантаження під час дослідження роботи СЕ в різних режимах.

2. На підставі аналізу результатів моделювання шести режимів роботи трифазної СЕ, у кожному з яких використано одиничний фактор, який зумовлює появу в системі додаткових втрат, зроблено висновок про

те, що найбільше зниження енергоефективності відповідає СЕ з нелінійним навантаженням.

3. На підставі розроблених математичних моделей оптимізовано роботу Matlab-моделі трифазної СЕ з САФ. Реалізовано можливість автоматизованого розрахування корегуючого коефіцієнта  $k_l$ , що більш ніж на порядок скоротило тривалість роботи з моделлю під час дослідження режимів роботи СЕ, в яких виникають додаткові втрати.

4. Створено еквівалентну Matlab-модель для дослідження динамічних режимів роботи п'яти розглянутих у підрозділі 4.1 СЕ рухомого складу метрополітену. Унаслідок того, що можна задати будь-яку форму графіка потужності навантаження, модель є універсальною. Результати, отримані під час моделювання, підтверджують коректність викладених у роботі теоретичних положень.

5. Запропоновано точний метод розрахування ККД із використанням Matlab-моделі симетричної системи електропостачання з можливістю завдання довільних циклічних графіків миттєвих активної й реактивної потужностей. Отримані на Matlab-моделі експериментальні результати дають змогу оцінити можливості розширення меж збільшення ККД.

6. Сучасні теорії потужності уможливають здійснення переходу від миттєвої реактивної потужності до інтегральної потужності втрат, яка дає змогу оцінити внесок реактивної потужності в загальні втрати у трифазній СЕ. Доведено, що різні причини появи розрахункової реактивної потужності в разі одного й того самого середньоквадратичного її значення призводять до рівнозначних втрат енергії в трифазній чотирипровідній СЕ за умови сталості середньої, розрахованої в періоді повторюваності, корисної активної потужності навантаження.

7. Моделювання системи електропостачання з нелінійним навантаженням і коефіцієнтом нелінійних спотворень струму 42 % та паралельним силовим активним фільтром і двома аналогічними некомпенсованими навантаженнями довело принципову можливість досягнути в реальному пристрої заданого значення коефіцієнта нелінійних спотворень мережевого струму на рівні 5 %. Експерименти на моделі підтвердили значний вплив індуктивності живлячої мережі й навантажень, підімкнених до неї, на якість роботи паралельного САФ, вхідні ємність і індуктивність якого необхідно підлаштовувати під певні параметри мережі й інших навантажень.

## ВИСНОВКИ

У монографії набула подальшого розвитку сучасна теорія миттєвих активної й реактивної потужностей, зокрема під час розроблення методів розрахування потужності втрат у трифазній СЕ, що містить енергозберігаючі напівпровідникові перетворювачі й накопичувачі енергії, здатні спричинити в системі двоспрямований енергетичний потік. Основні наукові та практичні результати:

1. Для двох просторових координатних систем  $pqw$  та  $\gamma\delta 0$ , запропонованих у [70], одержано 18 нових матричних співвідношень перетворення просторових декартових систем координат, що використовуються в сучасній теорії миттєвих активної й реактивної потужностей, і розширено загальну кількість координатних перетворень до 43.

2. Сформульовано теорему про мінімум втрат енергії в трифазних СЕ, справедливу для будь-якого з 288 можливих варіантів топології трифазної системи: «У трифазній системі електропостачання мінімальні втрати енергії  $\Delta P_{\min*}$ , тобто максимально можливий ККД  $\eta_{\max}$ , однозначно визначаються відношенням потужності резистивного короткого замикання на затискачах навантаження до корисної потужності, що дорівнює середньому значенню потужності навантаження, обчисленому в періоді повторюваності». Коректність теореми перевірено на спеціально розробленій комп'ютерній Matlab-моделі трифазної СЕ з САФ.

3. Можливе підвищення енергоефективності трифазних систем електропостачання, зокрема з двоспрямованим енергетичним потоком, і можливість збільшення ККД таких СЕ шляхом компенсування змінної складової миттєвої активної потужності одночасно з компенсуванням миттєвої реактивної потужності. При значеннях параметра відношення потужності резистивного короткого замикання системи до номінальної активної потужності навантаження в межах  $10 < P_{SC}/P_{usf} < 20$  сумарний ККД системи електропостачання теоретично може бути підвищений на 10–15 %.

4. Запропоновано визначення терміна «реактивна потужність», що відповідає основним положенням сучасної теорії миттєвих активної й реактивної потужностей. Доведено, що в трифазній СЕ одночасно відбуваються два фактично незалежні процеси обміну енергією: перший – це обмін енергією між джерелом і навантаженням з перетворенням енергії (швидкість першого обміну чисельно дорівнює миттєвій або середній за період повторюваності активній потужності, знаком активної потужності визначається напрям потоку енергії); другий – це обмін енергією між фазами навантаження для симетричних СЕ або між джерелом і навантаженням без

перетворення енергії для несиметричних СЕ, швидкість якого дорівнює миттєвій реактивній потужності. Другий обмін фактично не впливає на перший, проте спричиняє додаткові втрати енергії в лінії, пропорційні, квадрату середньоквадратичного значення реактивної потужності. Отже, реактивна потужність – це розрахункова величина, що визначає швидкість обміну енергією між фазами навантаження або навантаженням і джерелом трифазної СЕ, відношення квадрата середньоквадратичного значення якої до квадрата корисної потужності, помножене на значення мінімально можливої потужності втрат, дорівнює одній зі складових потужності додаткових втрат у СЕ.

5. Умови, що дають змогу позбутися помилок під час визначення енергоефективності СЕ:

- під час розрахування модуля вектора реактивної потужності, а також середньої або середньоквадратичної реактивної потужності, що обчислюються в періоді повторюваності, необхідно виміряти значення фазних напруг на затискачах джерела живлення (на початку живлячої лінії), а не на затискачах навантаження;

- під час визначення енергоефективності СЕ з САФ і накопичувачами енергії, що здатні забезпечити незмінність значення активної потужності, введено поняття періоду повторюваності, під яким розуміють найменший проміжок часу, у який вкладається найменше ціле число періодів наруги, струму, активної та реактивної потужності.

6. Запропоновано універсальне розрахункове співвідношення, що уможливорює подання потужності втрат трифазної СЕ, як суми складових, кожна із яких обумовлюється особливостями електромагнітних процесів, що відбуваються в СЕ, а саме: потужність мінімально можливих втрат, що відповідає постійній швидкості енергетичного потоку; потужність втрат, обумовлених реактивною потужністю, що відповідає наявному енергообміну між елементами СЕ; потужність втрат, обумовлених пульсаціями графіка миттєвої активної потужності, що відповідає змінюванню швидкості енергетичного потоку; потужність втрат, обумовлених протіканням струму в нульовому проводі; потужність втрат, обумовлених взаємовпливом електромагнітних процесів у лінійних проводах і нульовому проводі. Перевірка розрахункового співвідношення показала його високу точність для всіх режимів роботи трифазної СЕ.

7. Обґрунтовано концепцію подання складових сумарної потужності втрат трифазної СЕ, що базується на використанні р-q-г теорії миттєвої активної й реактивної потужностей. Згідно із запропонованою концепцією, сумарну потужність втрат можна подати у вигляді суми трьох складових  $\Delta P_{p*}$ ,  $\Delta P_{q*}$ ,  $\Delta P_{r*}$ , які визначаються проекціями узагальнених



просторових векторів струму й напруги на осі  $p-q-r$  системи координат. За допомогою перетворень  $p-q-r$  теорії миттєвої активної й реактивної потужностей отримано точне розрахункове співвідношення для визначення сумарної потужності втрат на підставі її складових, обумовлених особливостями електромагнітних процесів у трифазній СЕ.

8. Отримано розрахункові співвідношення для визначення коефіцієнтів несиметрії струму за зворотною й за нульовою послідовностями на підставі складових потужності втрат у  $pqr$ -координатах. Аналіз трьох систем складових сумарної потужності втрат довів можливість переходу із однієї системи складових сумарної потужності втрат в іншу. Коректність отриманих співвідношень і точність результатів розрахунків перевірено на створеній Matlab-моделі СЕ з САФ.

9. Ґрунтуючись на положеннях  $p-q-r$  теорії миттєвої активної й реактивної потужностей запропоновано спосіб вимірювання складових сумарної потужності втрат енергії в трифазних СЕ і прилад для його реалізації. Розрахування складових потужності втрат здійснюється на підставі вимірювальної інформації, що надходить із датчиків струму й напруги, які використовуються в системі управління САФ.

10. Запропоновано метод визначення показників енергетичної ефективності СЕ з двоспрямованим енергетичним потоком, що базується на використанні понять потоку та втрат енергії. За допомогою цього методу оцінено показники енергетичної ефективності п'яти можливих СЕ метрополітену: традиційної із односпрямованим енергетичним потоком, із рекуперацією енергії в мережу, із стаціонарним накопичувачем енергії, із бортовим накопичувачем енергії і безконтактної. Використання розробленого методу для оцінювання енергоефективності локальної Smart Grid із двоспрямованим енергетичним потоком магістрального типу показало резерв підвищення ККД у межах від 3 до 12 %.

11. Запропоновано два способи створення математичної моделі еквівалентної схеми трифазної СЕ. Перший базується на векторній, а другий – на матричній формі подання енергетичних процесів у трифазних системах, що уможливають вирішення проблеми підтримання на однаковому рівні значення середньої активної потужності навантаження під час дослідження роботи СЕ в 288 можливих режимах. За допомогою розроблених математичних моделей оптимізовано роботу Matlab-моделі трифазної СЕ з САФ. Реалізовано можливість автоматизованого розрахування поправочного коефіцієнта, що більш ніж на порядок скоротило тривалість роботи з моделлю під час дослідження режимів роботи СЕ, у яких виникають додаткові втрати.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алексеев Б. А. Планы повышения эффективного использования электроэнергии в Европе: роль силовой электроники / Б. А. Алексеев // Энергоэксперт. – 2009. – № 6. – С. 82–84.
2. Аналіз можливості збільшення ккд трифазної чотирипровідної системи живлення засобами паралельної активної фільтрації / М. Ю. Артеменко, М. Л. Батрак, В. М. Михальський, С. Й. Поліщук // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 6. – С. 12–18.
3. Боровик А. М. Приборы силовой электроники и оптоэлектроники на основе SiC и GaN / А. М. Боровик, И. Ю. Ловшенко // ФСК XXIII : матер. конф. – Гродно : ГрГУ, 2015. – С. 102–103.
4. Бронштейн И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1986. – 723 с.
5. Вариводов В. Н. Интеллектуальные электрические системы / В. Н. Вариводов, Ю. А. Коваленко // Электричество. – 2011. – № 9. – С. 4–9.
6. Горев А. А. Переходные процессы асинхронной машины / А. А. Горев. – Л. : Госэнергоиздат, 1950. – 522 с.
7. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 1999-01-01/. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 33 с.
8. ГОСТ 23875-88 Качество электрической энергии. Термины и определения. – Введ. 1989-01-07 – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 15 с.
9. ГОСТ Р 51317.4.30–2008 Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электроснабжения и подключаемые к ним технические средства. Общее руководство по измерениям гармоник и интергармоник и средствам измерений. – Введ. 2008-25-12. – М. : Стандартинформ, 2009. – 33 с.
10. ГОСТ Р 51317.4.7–2008 Методы измерений показателей качества электрической энергии. – Введ. 2008-25-12 – М. : Стандартинформ, 2009. – 54 с.
11. ГОСТ Р 54149–2010 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2010-21-12 – М. : Стандартинформ, 2012. – 20 с.
12. Демирчан К. С. Теоретические основы электротехники : в 2-х т. / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин. – СПб. : Питер, 2009. – т. 1. – 512 с.

13. Компенсация пульсаций мгновенной активной мощности в цепях с резистивной нагрузкой / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч. 6. – С. 36–41.

14. Домнин И. Ф. Определение мгновенных активных и реактивных мощностей в трехфазных электрических сетях с вентильными преобразователями / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров // Вісник приазовського державного технічного університету. – 2005. – № 15. – С. 70–74.

15. Домнин И. Ф. Минимизация высокочастотных гармоник, генерируемых выпрямителем двухканального компенсатора неактивных составляющих полной мощности / И. Ф. Домнин, Е. А. Кайда, Л. Ф. Симонова // Сборник научных трудов Вестник НТУ «ХПИ» : Автоматика та приладобудування. – 2010. – № 20 – С. 79–84.

16. Домнин И. Ф. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, Е. И. Сокол // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2004. – Ч. 1. – С. 80–91.

17. Дуглас Д. Демонстрационные проекты по интеллектуальным сетям: фокус на интеграции распределенных источников энергии / Д. Дуглас // Энергоэксперт. – 2011. – № 2. – С. 92–95.

18. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

19. Жежеленко И. В. Реактивная мощность в системах электроснабжения : учебное пособие для вузов / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко ; ММИ. – Киев : УМК ВО, 1989. – 108 с.

20. Железко Ю. С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях : руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 280 с.

21. Жемеров Г. Г. Уменьшение потерь энергии в коммунальных Smart Grid сетях за счет перехода от однофазных к трехфазным системам электроснабжения / Г. Г. Жемеров, И. О. Лобач // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – № 5. – С. 45–49.

22. Жемеров Г. Г. Верификация расчета элементов и качественных показателей работы системы электроснабжения с параллельным силовым активным фильтром / Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, Д. В. Тугай // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. 12. – С. 394–397.

23. Жемеров Г. Г. Взаимосвязь между модулем мгновенной реактивной мощности и КПД системы электроснабжения / Г. Г. Жемеров, Н. А. Ильина, О. В. Ильина // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 4. – С. 31–46.

24. Жемеров Г. Г. Зависимость дополнительных потерь в трехфазных системах электроснабжения от реактивной мощности и пульсаций мгновенной активной мощности / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 66–70.

25. КПД систем электроснабжения постоянного напряжения и трехфазной симметричной системы синусоидальных напряжений / Г. Г. Жемеров, Н. А. Ильина, О. В. Ильина, О. И. Ковальчук, Е. И. Сокол // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2010. – Ч. 2. – С. 107–118.

26. Жемеров Г. Г. КПД системы электроснабжения однофазного переменного напряжения прямоугольной и синусоидальной формы / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина, О. И. Ковальчук // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 2. – С. 7–15.

27. КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения с асимметричной нагрузкой / Г. Г. Жемеров, Н. А. Ильина, О. И. Ковальчук, Е. И. Сокол // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 1. – С. 22–31.

28. Жемеров Г. Г. Мгновенные и средние активные и реактивные мощности в линейных цепях с синусоидальными напряжениями / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2004. – Вип. 43. – С. 153–160.

29. Жемеров Г. Г. Мощность потерь и реактивная мощность в трехфазных системах электроснабжения при симметричных синусоидальных напряжениях источника / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Энергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2014. – № 9 (127). – С. 12–23.

30. Жемеров Г. Г. Накопители энергии компенсаторов пульсаций мгновенной активной мощности / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2007. – Ч. 3. – С. 23–28.

31. О понятиях «мгновенная активная мощность» и «мгновенная реактивная мощность» / Г. Г. Жемеров, Е. И. Сокол, Н. А. Ильина, О. В. Ильина // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2007. – Ч. 1. – С. 33–44.

32. Жемеров Г. Г. Преобразование координат в электроприводе и силовой электронике / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч. 1. – С. 81–88.

33. Жемеров Г. Г. Пути модернизации систем электроснабжения метрополитена / Г. Г. Жемеров, О. И. Холод // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2012. – Ч. 1. – С. 27–35.

34. Жемеров Г. Г. Развитие современных теорий мощности трехфазных четырехпроводных систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой / Г. Г. Жемеров, Е. И. Сокол, Д. В. Тугай // Електротехніка і електромеханіка. Спеціальний випуск до XXII Міжнародної науково-технічної конференції «Силовая електроніка та енергоефективність»: в 2-х т. – 2016. – Т. I. – № 4(1). – С. 11–19.

35. Жемеров Г. Г. Расчет параметров емкостного накопителя энергии компенсатора пульсаций мгновенной активной мощности / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина // Электричество. – 2008. – № 1. – С. 54–59.

36. Жемеров Г. Г. Система составляющих полной мощности и энергетических коэффициентов на основе р-q-г теории мощности / Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки» – 2004. – Ч. 6. – С. 69–74.

37. Системы электроснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии / Г. Г. Жемеров, Н. А. Ильина, Д. В. Тугай, О. И. Холод // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 1. – С. 41–49.

38. Жемеров Г. Г. Соотношения для преобразований координат обобщенных векторов напряжений и токов трехфазной системы электроснабжения / Г. Г. Жемеров, В. Ю. Колесник, О. В. Ильина // Справочное пособие. – Харьков. – НТУ «ХПИ», 2009. – 40 с.

39. Жемеров Г. Г. Составляющие мощности суммарных потерь электрической энергии в пространственных  $pq$  координатах / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – № 2. – С. 11–19.

40. Жемеров Г. Г. Составляющие суммарной мощности потерь в трехфазных системах электроснабжения при симметричных синусоидальных напряжениях источника / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 4. – С. 28–34.

41. Жемеров Г. Г. Теория мощности Фризе и современные теории мощности / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 6. – С. 63–65.

42. Уменьшение потерь и улучшение качества электроэнергии в системах коммунального электроснабжения / Г. Г. Жемеров, Н. А. Ильина, О. В. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2008. – Ч. 2. – С. 80–87.

43. Жемеров Г. Г. Уточнение универсальной формулы для определения мощности потерь в трехфазных системах электроснабжения / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – № 12. – С. 339–343.

44. Жемеров Г. Г. Физический смысл понятия «реактивная мощность» применительно к трехфазным системам электроснабжения с нелинейной нагрузкой / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 6. – С. 36–42.

45. Жемеров Г. Г. Энергия и мощность в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – № 1. – С. 45–57.

46. Жемеров Г. Г. Энергосберегающий эффект компенсации пульсаций мгновенной активной мощности / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2006. – Ч. 4. – С. 22–27.

47. Энергоэффективность компенсации фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощностей в трехфазной системе электроснабжения / Г. Г. Жемеров, И. Ф. Домнин, О. В. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. – 2007. – № 1. – С. 52–57.

48. Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощностей в трехфазной системе электроснабжения / Г. Г. Жемеров, И. Ф. Домнин, О. В. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. – 2007. – № 1. – С. 52–57.

49. Жемеров Г. Г. Энергоэффективность систем электроснабжения подвижного состава метрополитена / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай, О. И. Холод // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 1. – С. 67–74.

50. Жуйков В. Я. Спектральные преобразования функций с  $m$ -ичным аргументом: теория и применения / В. Я. Жуйков, Т. А. Терещенко, Ю. С. Петергеря. – Киев: Аверс, 2006. – 294 с.

51. Направления развития теории мгновенной мощности и ее применения в задачах электромеханики / М. В. Загирняк, Д. И. Родькин, А. П. Черный, Т. В. Коренькова // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 3. – С. 347–354.

52. Зотин О. Т. В преддверии возрождения постоянного тока. DC Remutch Upcoming / О. Т. Зотин // Энергосовет. – 2013. – № 1 (26). – С. 55–68.

53. Иванов А. М. Комбинированные энергоустановки с ИКЭ – основа эффективного использования топливно-энергетических ресурсов XXI века / А. М. Иванов, С. А. Иванов // Электротехника. – 2003. – № 12. – С. 2–6.

54. Ильина О. В. Энергосберегающие полупроводниковые преобразователи для коммунальных сетей электроснабжения: дис. канд. тех. наук: 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии / Ильина Ольга Владимировна; НТУ «ХПИ». – Харьков, 2008. – 199 с.

55. Казовский Е. Я. Переходные процессы в машинах переменного тока / Е. Я. Казовский. – М.: АН СССР, 1962. – 550 с.

56. Інтелектуальні системи керування потоками електроенергії у локальних об'єктах / О. В. Кириленко, Ю. С. Петергеря, Т. О. Терещенко, В. Я. Жуйков. – Київ: Медіа ПРЕС, 2005. – 212 с.

57. Кобец Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.

58. Ковач К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 344 с.

59. Кривицкий С. О. Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами / С. О. Кривицкий, И. И. Эпштейн. – М. : Энергия, 1970. – 150 с.
60. Лобко А. В. Енергозберігаючі напівпровідникові перетворювачі для перспективних систем електропостачання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії / Андрій Валерійович Лобко; НТУ «ХПІ». – Харків, 2016. – 20 с.
61. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей / О. А. Маевский. – М. : Энергия, 1978. – 320 с.
62. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники : в 2 т. / Л. Р. Нейман, П. О. Демирчан. – М. – Л. : Энергия, 1966. – 522 с.
63. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники : в 2 т. / Л. Р. Нейман, П. А. Калантаров. – Госэнергоиздат, М. – Л. : Энергия, 1959. – 444 с.
64. Основы электроники / Под ред. К. А. Круга. – М. : Госэнергоиздат, 1952. – 432 с.
65. Офіційний сайт КП «Харківський метрополітен» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.metro.kharkov.ua>. – (дата звернення: 25.02.2018). – Програма будівництва метро.
66. Пат.113522 Україна, МПК G 01 R 21/06. Спосіб вимірювання складових сумарної потужності втрат електроенергії в трифазній системі електропостачання / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай; власник ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. – № u201604952; заявл. 04.05.2016; опублік. 10.02.2017, Бюл. № 3. – 9 с.
67. Півняк Г. Г. Розрахунки електричних мереж систем електропостачання : навч. посібник / Г. Г. Півняк, Г. А. Кігель, Н. С. Волотковська; за ред. Г. Г. Півняка. – 4-те вид, доопрац. і доп. – Дніпро: Національний гірничий університет, 2011. – 223 с.
68. Полищук А. Применение карбид-кремниевых диодов Шоттки в IGBT-инверторах с жестким переключением / А. Полищук // Силовая электроника. – 2006. – № 1. – С. 102–106.
69. Поліщук С. Й. Аналіз побудови координатних систем у теорії миттєвої потужності трифазних кіл для керування пристроями активної фільтрації / С. Й. Поліщук, М. Ю. Артеменко, В. М. Михальський // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 2. – С. 25–35.



70. Поліщук С. Й. Підвищення електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів енергії з мережею живлення засобами керування та активної фільтрації : дис. канд. тех. наук : 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії / Поліщук Сергій Йосипович. – НТУУ «КПІ». – Київ, 2013. – 250 с.

71. Стратегія керування паралельним активним фільтром з частковим послабленням складової нульової послідовності напруг трифазної чотирипровідної мережі / С. Й. Поліщук, М. Ю. Артеменко, В. М. Михальський та ін. // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 12–19.

72. Поспелов Г. Е. Электрические системы и сети. Проектирование / Г. Е. Поспелов, В. Г. Федин // М. : Высшая школа, 1988. – 308 с.

73. Рейтинг стран мира по уровню потребления электроэнергии – информация об исследовании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gtmarket.ru/ratings/electric-power-consumption/info> (дата обращения: 25.02.2018). – Информация об исследовании и его результаты.

74. Родькин Д. И. К оценке показателей энергопроцессов с использованием положений мгновенной мощности / Д. И. Родькин // Вестник НТУ «ХПИ». Темат. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода». – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2013. – № 36 (1009). – С. 366–370.

75. Родькін Д. Й. Миттєва потужність трифазної мережі змінного струму / Д. Й. Родькін, Ю. В. Ромашихін // Інженерні та освітні технології в електротехнічних і комп'ютерних системах. – 2013. – № 3. – С. 80–93.

76. Родькин Д. И. Энергопроцессы в цепях с несинусоидальными напряжениями и токами без парадоксов (комментарий к дискуссионной статье профессора Долбни ВТ «Об одном парадоксе, возникающем при анализе цепей с выпрямителями») / Д. И. Родькин, А. П. Калинов // Вісник НТУ «ХПІ». Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 28. – С. 590–599.

77. Роменко К. А. Объединения информационных и операционных технологий для создания эффективной интеллектуальной сети / К. А. Роменко // Энергоэксперт. – 2011. – № 3. – С. 72–75.

78. Современные полупроводниковые приборы на основе карбида кремния фирмы ROHM Stmiconductor / Ю. Петропавловский // Силовая электроника. – 2011. – № 4. – С. 108–112.

79. Сокол Е. И. Силовая электроника и концепция развития энергетики «Smart Grid» / Е. И. Сокол, Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Энергоснабжение. Энергетика. Энергоаудит (Специальный выпуск). – 2013. – Т. 1. – № 8 (114). – С. 7–16.

80. Управление преобразователем автономной системы передачи энергии однофазным переменным током квазипрямоугольной формы / Е. И. Сокол, Ю. П. Гончаров, В. В. Замаруев та ін. // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність» – 2009. – Ч. 1. – С. 27–30.

81. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 52–65.

82. Стогній Б. С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44–50.

83. Тугай Д. В. Моделирование режимов работы трехфазных систем электроснабжения при оценке составляющих суммарной мощности потер / Д. В. Тугай // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – № 4. – С. 43–53.

84. Хворост Н. В. Концепция новой структуры системы электрической тяги для метрополитена / Н. В. Хворост // Коммунальное хозяйство городов. – 2003. – № 53. – С. 172–179.

85. Шакарян Ю. Г. Перспективы применения накопителей энергии в ЕНЭС и ЕЭС России / Ю. Г. Шакарян // Вести в электроэнергетике. – 2010. – № 4. – С. 16–22.

86. Шидловський А. К. Аналіз закономірностей та тенденцій підвищення енергетичної ефективності в Україні, країнах Центральної та Східної Європи / А. К. Шидловський, Г. М. Федоренко, Е. І. Удод // Новини енергетики. – 2001. – № 3 – С. 87–93.

87. Шидловський А. К. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії / А. К. Шидловський. – Київ : Українські енциклопедичні знання, 2007. – 560 с.

88. Відновлювальні джерела енергії у локальних об'єктах / Ю. І. Якименко, Є. І. Сокол, В. Я. Жуйков та ін. – Київ : Політехніка, 2001. – 113 с.

89. Яковлев Г. Н. Применение постоянного тока в электроснабжении социально-бытового сектора экономики с целью снижения потерь электроэнергии / Г. Н. Яковлев // Энергосовет. – 2011. – № 6 (19). – С. 65–66.

90. Afonso J. Active filters with control based on p-q theory / J. Afonso, C. Couto, J. Martins // IEEE Industrial Electronics Society Newsletter. – 2000. – Vol. 47. – No. 3. – P. 5–10.

91. Akagi H. Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters / H. Akagi, Y. Tsukamoto, A. Nubae // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1990. – Vol. 26. – P. 93–98.

92. Akagi H. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits / H. Akagi, Y. Kanazava, A. Nubae // Int. Power Electronics Conf. Tokio. Japan. – 1983. – P. 1375–1386.

93. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E.H. Vatanabe, M. Aredes. – IEEE Press Willy-Interscience. – 2007. – 379 p.

94. Akagi H. Instantaneous reactive power compensations comprising switching devices without energy storage components / H. Akagi, Y. Kanazava, A. Nubae // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1984. – Vol. 20. – P. 625–630.

95. Comparisons between the p-q and p-q-r theories in three-phase four-wire systems / M. Aredes, H. Akagi, E. H. Watanabe, E. V. Salgado, L. F. Encarnacao // IEEE Trans. on PE. – 2009. – Vol. 24. – No. 4. – P. 924–933.

96. The effect of load power factor on the efficiency of three-phase four-wire power system with shunt active filter / M. Y. Artemenko, L. M. Batrak, S. Y. Polishchuk, V. M. Mykhalskyi, I. A. Shapoval // 2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – IEEE, 2016. – P. 277–282.

97. Baldea I. Control systems in adjustable-speed drivers / I. Baldea // IEEE, Industrial Electronics magazine, September. – 2008. – P. 32–50.

98. Boyd J. An internet – inspired electricity grid / J. Boyd // IEEE Spectrum. – 2013. – No. 1. – P. 12–13.

99. Boyd J. An internet – inspired electricity Grid / J. Boyd // IEEE Spectrum, January. – 2013. – № 1. – P. 12–13.

100. Budeanu C. I. Puissances réactives et fictives / C. I. Budeanu // Ins. Bucharest. Romaine de Energie. – 1927. – 360 p.

101. Chattopadhyay A. K. Alternating current drives in the steel industry. Advancements in the last 30 years / A. K. Chattopadhyay // IEEE, Industrial Electronics magazine. – 2010. – P. 30–42.
102. Chen Z. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines / Z. Chen, J.M. Guerrero, F. Blaabjerg // IEEE Trans. on PE. – 2009. – Vol. 24. – No. 8. – P. 1859–1875.
103. Depenbrock M. Concerning instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory / M. Depenbrock, V. Staudt, H. Wrede // IEEE Trans. Power. Electron. – 2004. – Vol. 19. – No. 4. – P. 1151–1152.
104. Fryze S. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems / S. Fryze // Przegląd Elektrot. – 1931. – No. 7. – P. 193–203.
105. Fryze S. Wirk-. Blind. und Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusoidalem Verlauf von Strom und Spannung / S. Fryze // Elect. Zeitschrift. – 1932. – Vol. 53. – No. 25. – P. 596–599.
106. Energy internet – future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) systems / A. Huang, G. Heydt, S. Dale, J. Zheng, M. Crow // IEEE Power Electronics Society News letter. – 2008. – Fourth Quarter. – P. 8–9.
107. IEEE Std. 1547.2-2008. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, 2008. – 219 p.
108. IEEE STD/1459-2000. IEEE Trial Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions ; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000. – 52 p.
109. PWM Regenerative rectifiers: state of art / R. Jose, J. R. Rodriguez, J. W. Dixon, J. R. Espinoza, J. Pontt, P. Lezan // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2005. – Vol. 52. – No. 1. – P. 5–22.
110. Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory / H. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, I. Choi // IEEE Trans. Power Electronics. – 2002. – Vol. 17. – No. 5. – P. 701–710.
111. Kim H. Reference wave generation in dynamic voltage restorers by use of the pqr power theory / H. Kim, S. Lee, S. Sul // In Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Exp. (APEC 2004). – 2004. – Vol. 3. – P. 1452–1457.
112. Kim H. S. The instantaneous power theory based on mapping matrices in three-phase four-wire systems / H. S.Kim, H. Akagi // In Proc. PCC'97 Conf. Nagaoka, Japan. – 1997. – Vol. 1. – P. 361–366.

113. Kim H. S. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames / H. S. Kim, H. Akagi // In. Proc. IEEE/PEDS'99 Conf., Hong Kong, July. – 1999. – P. 422–427.
114. Recent advances in industrial applications of multilevel converters / S. Kouro, W. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez, M. A. Perer, J. I. Leon // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 17. – No. 8. – P. 2553–2580.
115. Kovalenco K. The Smart Grid / K. Kovalenco // IEEE The Institute, Desember. – 2010. – P. 5.
116. Lee S. A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory / S. Lee, H. Kim, S. Sul, F. Blaabjerg // IEEE Trans. Power Electron. – 2004. – Vol. 19. – No. 3. – P. 814–827.
117. Lyon W. V. Reactive power and unbalanced circuits / W. V. Lyon // Electrical world. – 1920. – Vol. 75. – No. 25. – P. 1417–1420.
118. Nabae A. A new definition of instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits / A. Nabae, T. Tanaka // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11. – No. 3. – P. 1238–1243.
119. Ng F. Analysis and control of UPQS and its DC-link power by use of p-q-r instantaneous power theory / F. Ng, M. Vong, Y. Han // In Proc. 1st Int. Conf. Power Electron. Syst. Appl. – 2004. – P. 43–53.
120. Park R.H. Definition of the ideal synchronous machines / R.H. Park // GER. – 1928. – 332 p.
121. Park R. H. Two-reaction theory of synchronous machines / R. H. Park // Trans. – AJEE. – 1928. – 716 p.
122. Peng F. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems / F. Peng, G. Ott, D. Adams // IEEE Trans. Power Electronics. – 1998. – Vol. 13. – No. 6. – P. 1174–1181.
123. Peng F. Z. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems / F. Z. Peng, J. S. Lai // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1996. – Vol. 45. – No. 1. – P. 293–297.
124. Rodriguez J. Multilevel inverters: A survey of topologies, control and applications / J. Rodriguez, J. S. Lai, F. Z. Peng // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2002. – Vol. 49. – No. 4. – P. 724–738.
125. Smart Grid – European Technology Platform for Electricity Networks of the Future. [Electronic resource]. – European Commission, 2005. – Mode of access: <http://www.smartGrid.eu/> (last access 14.12.2016).

126. Soares V. An instantaneous active and reactive current component method for active filters / V. Soares, P. Verdelho, G. D. Marques // IEEE Trans. Power Electr. – 2000. – Vol. 15. – P. 660–669.

127. The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems / H. S. Kim, S. Ogasawara, H. Akagi // In Proc. IEEC/IAS'99. – Annu. Meeting. – Oct., 1999. – pp. 431–439.

128. Wong M. C. Active Power Filters / M. C. Wong, N. Y. Dai, C. S. Lam // Parallel Power Electronics Filters in Three-Phase Four-Wire Systems. – Springer Singapore. – 2016. – P. 59–165.

129. Zhemerov G. The Theorem of Minimum Energy Losses in Three-Phase Four-Wire Energy Supply System / G. Zhemerov, N. Ilina, D. Tugay // 2016 2nd IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2016). June 07-11, Kyiv, Ukraine. – 2016. – P. 52–54.

## ДОДАТКИ

### ДОДАТОК А

#### Перетворення просторових систем координат сучасних теорій миттєвих активної й реактивної потужностей

У додатку систематизовано матричні співвідношення для взаємних прямих (позначення  $\rightarrow$ ) і зворотних (позначення  $\leftarrow$ ) перетворень просторових декартових систем координат  $abc$ ,  $\alpha\beta 0$ ,  $dq0$ ,  $pqr$ ,  $a'b'c'$ ,  $\gamma\delta 0$ ,  $pgw$ . Останні дві координатні системи запропоновані в [70].

$abc \rightarrow \alpha\beta 0$	$abc \leftarrow \alpha\beta 0$
$\begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$
$abc \rightarrow dq0$	$abc \leftarrow dq0$
$\begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 & \frac{\sqrt{3} \sin \theta_1 - \cos \theta_1}{\sqrt{6}} & -\frac{\sqrt{3} \sin \theta_1 + \cos \theta_1}{\sqrt{6}} \\ -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta_1 & \frac{\sin \theta_1 + \sqrt{3} \cos \theta_1}{\sqrt{6}} & \frac{\sin \theta_1 - \sqrt{3} \cos \theta_1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta_1 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{\sqrt{3} \sin \theta_1 - \cos \theta_1}{\sqrt{6}} & \frac{\sin \theta_1 + \sqrt{3} \cos \theta_1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{\sqrt{3} \sin \theta_1 + \cos \theta_1}{\sqrt{6}} & \frac{\sin \theta_1 - \sqrt{3} \cos \theta_1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$

$abc \rightarrow pqr$	$abc \leftarrow pqr$
$\begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sqrt{\frac{1}{3}} \sin \theta_2 & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \sqrt{\frac{1}{3}} \sin \theta_2 & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \sqrt{\frac{1}{3}} \sin \theta_2 \\ -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta_1 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \sqrt{\frac{1}{3}} \cos \theta_2 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) \sin \theta_2 + \sqrt{\frac{1}{3}} \cos \theta_2 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \sin \theta_2 + \sqrt{\frac{1}{3}} \cos \theta_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sqrt{\frac{1}{3}} \sin \theta_2 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \sqrt{\frac{1}{3}} \cos \theta_2 & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \sqrt{\frac{1}{3}} \sin \theta_2 \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \sqrt{\frac{1}{3}} \sin \theta_2 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) \sin \theta_2 + \sqrt{\frac{1}{3}} \cos \theta_2 \\ -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta_2 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \sin \theta_2 + \sqrt{\frac{1}{3}} \cos \theta_2 \end{bmatrix}$
$abc \rightarrow a'b'c$	$abc \leftarrow a'b'c$
$\begin{bmatrix} \frac{1}{3}(1+2\cos\theta_1) & \frac{1}{3}\left(1+2\cos\left(\theta_1-\frac{2\pi}{3}\right)\right) & \frac{1}{3}\left(1+2\cos\left(\theta_1+\frac{2\pi}{3}\right)\right) \\ \frac{1}{3}\left(1+2\cos\left(\theta_1+\frac{2\pi}{3}\right)\right) & \frac{1}{3}(1+2\cos\theta_1) & \frac{1}{3}\left(1+2\cos\left(\theta_1-\frac{2\pi}{3}\right)\right) \\ \frac{1}{3}\left(1+2\cos\left(\theta_1-\frac{2\pi}{3}\right)\right) & \frac{1}{3}\left(1+2\cos\left(\theta_1+\frac{2\pi}{3}\right)\right) & \frac{1}{3}(1+2\cos\theta_1) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{3}(1+2\cos\theta_1) & \frac{1}{3}\left(1+2\cos\left(\theta_1+\frac{2\pi}{3}\right)\right) & \frac{1}{3}\left(1+2\cos\left(\theta_1-\frac{2\pi}{3}\right)\right) \\ \frac{1}{3}\left(1+2\cos\left(\theta_1-\frac{2\pi}{3}\right)\right) & \frac{1}{3}(1+2\cos\theta_1) & \frac{1}{3}\left(1+2\cos\left(\theta_1+\frac{2\pi}{3}\right)\right) \\ \frac{1}{3}\left(1+2\cos\left(\theta_1+\frac{2\pi}{3}\right)\right) & \frac{1}{3}\left(1+2\cos\left(\theta_1-\frac{2\pi}{3}\right)\right) & \frac{1}{3}(1+2\cos\theta_1) \end{bmatrix}$
$abc \rightarrow \gamma\delta 0$	$abc \leftarrow \gamma\delta 0$
$\begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_4 & \frac{\sqrt{3} \sin \theta_4 - \cos \theta_4}{\sqrt{6}} & -\frac{\sqrt{3} \sin \theta_4 + \cos \theta_4}{\sqrt{6}} \\ -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta_4 & \frac{\sin \theta_4 + \sqrt{3} \cos \theta_4}{\sqrt{6}} & \frac{\sin \theta_4 - \sqrt{3} \cos \theta_4}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_4 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta_4 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{\sqrt{3} \sin \theta_4 - \cos \theta_4}{\sqrt{6}} & \frac{\sin \theta_4 + \sqrt{3} \cos \theta_4}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{\sqrt{3} \sin \theta_4 + \cos \theta_4}{\sqrt{6}} & \frac{\sin \theta_4 - \sqrt{3} \cos \theta_4}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$
$\alpha\beta 0 \rightarrow dq0$	$\alpha\beta 0 \leftarrow dq0$
$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$



$\alpha\beta 0 \rightarrow pqr$	$\alpha\beta 0 \leftarrow pqr$
$\begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos\theta_2 & \sin\theta_1 \cos\theta_2 & \sin\theta_2 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ -\cos\theta_1 \sin\theta_2 & -\sin\theta_1 \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos\theta_2 & -\sin\theta_1 & -\cos\theta_1 \sin\theta_2 \\ \sin\theta_1 \cos\theta_2 & \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 \sin\theta_2 \\ \sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}$
$\alpha\beta 0 \rightarrow pgw$	$\alpha\beta 0 \leftarrow pgw$
$\begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos\theta_2 & \sin\theta_1 \cos\theta_2 & \sin\theta_2 \\ -\sin\theta_1 \cos\theta_3 - \cos\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 & \cos\theta_1 \cos\theta_3 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 & \cos\theta_2 \sin\theta_3 \\ -\sin\theta_1 \sin\theta_3 - \cos\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 & -\cos\theta_1 \sin\theta_3 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 & \cos\theta_2 \cos\theta_3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos\theta_2 & -\sin\theta_1 \cos\theta_3 - \cos\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 & -\sin\theta_1 \sin\theta_3 - \cos\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 \\ \sin\theta_1 \cos\theta_2 & \cos\theta_1 \cos\theta_3 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 & -\cos\theta_1 \sin\theta_3 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \sin\theta_3 & \cos\theta_2 \cos\theta_3 \end{bmatrix}$
$\alpha\beta 0 \rightarrow \gamma\delta 0$	$\alpha\beta 0 \leftarrow \gamma\delta 0$
$\begin{bmatrix} \cos\theta_4 & \sin\theta_4 & 0 \\ -\sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$dq0 \rightarrow pqr$	$dq0 \leftarrow pqr$
$\begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & -\sin\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}$
$dq0 \rightarrow pgw$	$dq0 \leftarrow pgw$
$\begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 \\ -\sin\theta_2 \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & \cos\theta_2 \sin\theta_3 \\ -\cos\theta_3 \sin\theta_2 & -\sin\theta_3 & \cos\theta_2 \cos\theta_3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 \sin\theta_3 & -\cos\theta_3 \sin\theta_2 \\ 0 & \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \sin\theta_3 & \cos\theta_2 \cos\theta_3 \end{bmatrix}$
$dq0 \rightarrow \gamma\delta 0$	$dq0 \leftarrow \gamma\delta 0$
$\begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_4) & -\sin(\theta_1 + \theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_1 + \theta_4) & \cos(\theta_1 + \theta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_4) & \sin(\theta_1 + \theta_4) & 0 \\ -\sin(\theta_1 + \theta_4) & \cos(\theta_1 + \theta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

$pqr \rightarrow a'b'c$	$pqr \leftarrow a'b'c$
$\begin{bmatrix} \cos(\delta - \theta_2) & 0 & \sin(\delta - \theta_2) \\ -\frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\delta - \theta_2) & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}}\cos(\delta - \theta_2) \\ -\frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\delta - \theta_2) & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}}\cos(\delta - \theta_2) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos(\delta - \theta_2) & -\frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\delta - \theta_2) & -\frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\delta - \theta_2) \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \sin(\delta - \theta_2) & \frac{1}{\sqrt{2}}\cos(\delta - \theta_2) & \frac{1}{\sqrt{2}}\cos(\delta - \theta_2) \end{bmatrix}$
$pqr \rightarrow pgw$	$pqr \leftarrow pgw$
$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_3 & \sin\theta_3 \\ 0 & -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 \\ 0 & \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}$
$pqr \rightarrow \gamma\delta 0$	$pqr \leftarrow \gamma\delta 0$
$\begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & -\sin\theta_4 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & \cos\theta_4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & \sin\theta_4 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_4 & 0 & \cos\theta_4 \end{bmatrix}$
$a'b'c \rightarrow pgw$	$a'b'c \leftarrow pgw$
$\begin{bmatrix} \cos(\delta - \theta_2) & -\frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\delta - \theta_2) & -\frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\delta - \theta_2) \\ \sin(\delta - \theta_2)\sin\theta_3 & \frac{\cos\theta_3 + \cos(\delta - \theta_2)\sin\theta_3}{\sqrt{2}} & -\frac{\cos(\delta - \theta_2)\sin\theta_3 - \cos\theta_3}{\sqrt{2}} \\ \sin(\delta - \theta_2)\cos\theta_3 & \frac{\cos(\delta - \theta_2)\cos\theta_3 - \sin\theta_3}{\sqrt{2}} & \frac{\cos(\delta - \theta_2)\cos\theta_3 + \sin\theta_3}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos(\delta - \theta_2) & \frac{\sin(\delta - \theta_2)\sin\theta_3}{\cos\theta_3 + \cos(\delta - \theta_2)\sin\theta_3} & \frac{\sin(\delta - \theta_2)\cos\theta_3}{\cos(\delta - \theta_2)\cos\theta_3 - \sin\theta_3} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\delta - \theta_2) & \frac{\cos\theta_3 + \cos(\delta - \theta_2)\sin\theta_3}{\sqrt{2}} & \frac{\cos(\delta - \theta_2)\cos\theta_3 - \sin\theta_3}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}}\sin(\delta - \theta_2) & -\frac{\cos(\delta - \theta_2)\sin\theta_3 - \cos\theta_3}{\sqrt{2}} & \frac{\cos(\delta - \theta_2)\cos\theta_3 + \sin\theta_3}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$
$pgw \rightarrow \gamma\delta 0$	$pgw \leftarrow \gamma\delta 0$
$\begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4\sin\theta_3 & -\cos\theta_4\sin\theta_2 \\ 0 & \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4\sin\theta_3 & \cos\theta_4\cos\theta_3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & \sin\theta_4 \\ -\sin\theta_4\sin\theta_3 & \cos\theta_3 & \cos\theta_4\sin\theta_3 \\ -\cos\theta_3\sin\theta_4 & -\sin\theta_3 & \cos\theta_4\cos\theta_3 \end{bmatrix}$

# ДОДАТОК Б

## Розрахування складових сумарної потужності втрат і його експериментальна перевірка

Таблиця Б.1 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 1 при  $R_n = \infty$

$R_{load}$ , ОМ	$L$ , мГн	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_q^*$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}$ , %
											r	q			
0,3256	0	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3256	0,2777	0,922	0	20	0,943	0,2906	0	0,06046	<b>0,06045</b>	0,05574	<b>0,004708</b>	0	0	0	0,016
0,3256	0,3772	0,842	0	20	0,9379	0,4322	0	0,0662	<b>0,06616</b>	0,05574	<b>0,01041</b>	0	0	0	0,06
0,3256	0,4833	0,6775	0	20	0,924	0,6883	0	0,08228	<b>0,08215</b>	0,05574	<b>0,02641</b>	0	0	0	0,158
0,3127	0	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3127	0,2667	0,9215	0	15	0,9225	0,2908	0	0,08398	<b>0,08393</b>	0,07734	<b>0,006543</b>	0	0	0	0,059
0,3127	0,3623	0,8413	0	15	0,9158	0,4327	0	0,09199	<b>0,09188</b>	0,07735	<b>0,01449</b>	0	0	0	0,119
0,3127	0,4641	0,6748	0	15	0,8971	0,691	0	0,1147	<b>0,1143</b>	0,07735	<b>0,03695</b>	0	0	0	0,349
0,2857	0	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	0	0	0	0
0,2857	0,2437	0,9211	0	10	0,8788	0,2909	0	0,1379	<b>0,1378</b>	0,127	<b>0,01075</b>	0	0	0	0,072
0,2857	0,331	0,839	0	10	0,8685	0,4338	0	0,1514	<b>0,1509</b>	0,127	<b>0,0239</b>	0	0	0	0,33
0,2857	0,4241	0,665	0	10	0,8396	0,7013	0	0,191	<b>0,1895</b>	0,127	<b>0,06246</b>	0	0	0	0,8

Таблиця Б.2 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 2 при  $R_n = \infty$

$R_{load}$ , ОМ	$k_b$	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_q^*$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}$ , %
											r	q			
0,3256	1	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0
0,3256	1,3	1,1008	0	20	0,9446	0,1611	0,1611	0,05865	<b>0,05864</b>	0,05574	<b>0,001447</b>	0	<b>0,001447</b>	0	0,016
0,3256	1,35	1,173	0	20	0,9428	0,2091	0,2091	0,06064	<b>0,06062</b>	0,05574	<b>0,002437</b>	0	<b>0,002437</b>	0	0,038
0,3256	1,4	1,358	0	20	0,9387	0,2928	0,2928	0,06532	<b>0,0653</b>	0,05574	<b>0,004775</b>	0	<b>0,004775</b>	0	0,027
0,3127	1	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0
0,3127	1,3	1,0985	0	15	0,9247	0,1614	0,1614	0,08144	<b>0,08142</b>	0,07734	<b>0,002016</b>	0	<b>0,002016</b>	0	0,028
0,3127	1,35	1,1685	0	15	0,9223	0,2097	0,2097	0,08427	<b>0,0842</b>	0,07735	<b>0,003404</b>	0	<b>0,003404</b>	0	0,087
0,3127	1,4	1,348	0	15	0,9167	0,2945	0,2945	0,0909	<b>0,09081</b>	0,07735	<b>0,00671</b>	0	<b>0,00671</b>	0	0,098
0,2857	1	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0
0,2857	1,3	1,0935	0	10	0,882	0,162	0,162	0,1338	<b>0,1337</b>	0,127	<b>0,003333</b>	0	<b>0,003333</b>	0	0,056
0,2857	1,35	1,1595	0	10	0,8783	0,211	0,211	0,1385	<b>0,1383</b>	0,127	<b>0,005655</b>	0	<b>0,005655</b>	0	0,129
0,2857	1,4	1,326	0	10	0,8696	0,298	0,298	0,15	<b>0,1496</b>	0,127	<b>0,011285</b>	0	<b>0,011285</b>	0	0,268

Таблиця Б.3 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 3 при  $R_n = \infty$ 

$R_{load},$ Ом	$L, \text{ мГн}$	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}, \%$
											r	q			
0,3256	0	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0
0,3256	0	0,995	1	20	0,9428	0,2951	0,04243	0,06072	<b>0,0607</b>	0,05574	<b>0,004854</b>	0	<b>0,0001</b>	0	0,03
0,3256	0	0,9887	1,5	20	0,9372	0,4451	0,06406	0,06706	<b>0,06702</b>	0,05574	<b>0,01104</b>	0	<b>0,000229</b>	0	0,07
0,3256	0	0,98	2	20	0,9292	0,5983	0,08613	0,07619	<b>0,07611</b>	0,05574	<b>0,01996</b>	0	<b>0,000413</b>	0	0,102
0,3127	0	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0
0,3127	0	0,993	1	15	0,9222	0,2955	0,04253	0,08434	<b>0,08425</b>	0,07734	<b>0,006755</b>	0	<b>0,00014</b>	0	0,109
0,3127	0	0,9843	1,5	15	0,9147	0,4466	0,06428	0,09327	<b>0,0931</b>	0,07735	<b>0,01544</b>	0	<b>0,00032</b>	0	0,172
0,3127	0	0,9718	2	15	0,9039	0,602	0,08662	0,1063	<b>0,106</b>	0,07735	<b>0,02804</b>	0	<b>0,00058</b>	0	0,274
0,2857	0	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0
0,2857	0	0,9887	1	10	0,8783	0,2964	0,04266	0,1386	<b>0,1384</b>	0,127	<b>0,01116</b>	0	<b>0,00023</b>	0	0,133
0,2857	0	0,974	1,5	10	0,8667	0,4497	0,06473	0,1537	<b>0,1532</b>	0,127	<b>0,0257</b>	0	<b>0,0005</b>	0	0,329
0,2857	0	0,953	2	10	0,8501	0,6098	0,08775	0,1763	<b>0,1752</b>	0,127	<b>0,04724</b>	0	<b>0,00098</b>	0	0,601

Таблиця Б.4 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 4 при  $R_n = \infty$ 

$R_{load},$ Ом	$k_{sb}$	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}, \%$
											r	q			
0,3256	1	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,3256	1,3	0,948	0	20	0,9445	0,2257	0,3228	0,0588	<b>0,0586</b>	0,05574	<b>0</b>	<b>0,002839</b>	–	0	0,371
0,3256	1,35	0,918	0	20	0,9428	0,2813	0,4049	0,06072	<b>0,06016</b>	0,05574	<b>0</b>	<b>0,004412</b>	–	0	0,934
0,3256	1,4	0,8608	0	20	0,9392	0,3616	0,5258	0,06476	<b>0,06303</b>	0,05574	<b>0</b>	<b>0,007289</b>	–	0	2,665
0,3127	1	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,3127	1,3	0,9455	0	15	0,9243	0,2306	0,3299	0,08185	<b>0,08147</b>	0,07735	<b>0</b>	<b>0,004114</b>	–	0	0,469
0,3127	1,35	0,9144	0	15	0,922	0,2877	0,4141	0,08464	<b>0,8376</b>	0,07735	<b>0</b>	<b>0,006402</b>	–	0	1,039
0,3127	1,4	0,8545	0	15	0,917	0,3704	0,5385	0,09057	<b>0,08796</b>	0,07735	<b>0</b>	<b>0,01061</b>	–	0	2,874
0,2857	1	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,2857	1,3	0,9397	0	10	0,8809	0,242	0,3461	0,1352	<b>0,1345</b>	0,127	<b>0</b>	<b>0,007437</b>	–	0	0,5333
0,2857	1,35	0,9053	0	10	0,877	0,3024	0,4353	0,1403	<b>0,1386</b>	0,127	<b>0</b>	<b>0,01162</b>	–	0	1,194
0,2857	1,4	0,839	0	10	0,8685	0,391	0,5686	0,1514	<b>0,1464</b>	0,127	<b>0</b>	<b>0,01942</b>	–	0	3,277

Таблиця Б.5 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 1 + режим 2 при  $R_n = \infty$ 

$R_{load}$ , ОМ	$L$ , мГн	$k_l$	$k_b$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_{\eta}^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}$ , %
											r	q			
0,3256	0	1	1	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3256	0,2777	1,0023	1,3	20	0,9399	0,3476	0,1621	0,06397	<b>0,06394</b>	0,05574	<b>0,006735</b>	0	0,001465	0	0,036
0,3256	0,2777	1,0586	1,35	20	0,9377	0,383	0,2113	0,06745	<b>0,06741</b>	0,05574	<b>0,008176</b>	0	0,002489	0	0,057
0,3256	0,2777	1,1977	1,4	20	0,9323	0,4596	0,2992	0,07258	<b>0,07251</b>	0,05574	<b>0,01178</b>	0	0,004992	0	0,093
0,3256	0,3772	0,9014	1,3	20	0,934	0,4889	0,163	0,0706	<b>0,07055</b>	0,05574	<b>0,01333</b>	0	0,001481	0	0,072
0,3256	0,3772	0,9405	1,35	20	0,9312	0,5273	0,2134	0,07385	<b>0,07378</b>	0,05574	<b>0,0155</b>	0	0,002538	0	0,101
0,3256	0,3772	1,028	1,4	20	0,9238	0,6189	0,3056	0,08242	<b>0,08223</b>	0,05574	<b>0,02135</b>	0	0,005206	0	0,149
0,3256	0,4833	0,681	1,3	20	0,9159	0,7855	0,1643	0,09182	<b>0,09164</b>	0,05574	<b>0,03439</b>	0	0,001504	0	0,195
0,3256	0,4833	0,665	1,35	20	0,9083	0,8717	0,2163	0,10095	<b>0,1007</b>	0,05574	<b>0,04235</b>	0	0,002609	0	0,243
0,3256	0,4833	–	1,4	20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,3127	0	1	1	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3127	0,2667	0,9997	1,3	15	0,9184	0,348	0,1623	0,08889	<b>0,08876</b>	0,07735	<b>0,009366</b>	0	0,002038	0	0,153
0,3127	0,2667	1,0545	1,35	15	0,9154	0,3836	0,2118	0,09236	<b>0,09221</b>	0,07735	<b>0,01138</b>	0	0,00347	0	0,173
0,3127	0,2667	1,1885	1,4	15	0,9082	0,4613	0,3006	0,10104	<b>0,1008</b>	0,07735	<b>0,01646</b>	0	0,00699	0	0,242
0,3127	0,3623	0,8985	1,3	15	0,9106	0,4898	0,1632	0,09819	<b>0,09797</b>	0,07735	<b>0,01856</b>	0	0,002059	0	0,227
0,3127	0,3623	0,9362	1,35	15	0,9068	0,5284	0,2137	0,10275	<b>0,1025</b>	0,07735	<b>0,0216</b>	0	0,003532	0	0,263
0,3127	0,3623	1,019	1,4	15	0,8969	0,6214	0,3066	0,11491	<b>0,1145</b>	0,07735	<b>0,02987</b>	0	0,007272	0	0,3618
0,3127	0,4641	0,675	1,3	15	0,8861	0,7913	0,1643	0,12847	<b>0,1279</b>	0,07735	<b>0,04843</b>	0	0,002089	0	0,463
0,3127	0,4641	0,654	1,35	15	0,8755	0,8838	0,2166	0,14221	<b>0,1414</b>	0,07735	<b>0,06042</b>	0	0,003628	0	0,573
0,3127	0,4641	–	1,4	15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,2857	0	1	1	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	0	0	0	0
0,2857	0,2437	0,9945	1,3	10	0,8725	0,3486	0,1628	0,14215	<b>0,1458</b>	0,127	<b>0,01544</b>	0	0,003365	0	0,225
0,2857	0,2437	1,045	1,35	10	0,868	0,385	0,2127	0,15207	<b>0,1516</b>	0,127	<b>0,01882</b>	0	0,005749	0	0,318
0,2857	0,2437	1,1675	1,4	10	0,8569	0,4649	0,3034	0,16697	<b>0,1662</b>	0,127	<b>0,02746</b>	0	0,01169	0	0,488
0,2857	0,331	0,892	1,3	10	0,8607	0,4916	0,1634	0,16182	<b>0,1611</b>	0,127	<b>0,0307</b>	0	0,003393	0	0,438
0,2857	0,331	0,926	1,35	10	0,855	0,5312	0,2144	0,16961	<b>0,1687</b>	0,127	<b>0,03584</b>	0	0,005836	0	0,543
0,2857	0,331	0,9975	1,4	10	0,8399	0,6274	0,3086	0,19062	<b>0,1891</b>	0,127	<b>0,04999</b>	0	0,01209	0	0,7974
0,2857	0,4241	0,654	1,3	10	0,8217	0,8135	0,1644	0,21699	<b>0,2145</b>	0,127	<b>0,08405</b>	0	0,003434	0	1,151
0,2857	0,4241	0,61	1,35	10	0,8009	0,9376	0,2168	0,24845	<b>0,2446</b>	0,127	<b>0,1117</b>	0	0,005968	0	1,538
0,2857	0,4241	–	1,4	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблиця Б.6 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 1 + режим 3 при  $R_n = \infty$ 

$R_{load},$ ОМ	$L, \text{ мГн}$	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_{\eta}^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}, \%$
											r	q			
0,3256	0	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3256	0,2777	0,915	1	20	0,9373	0,4362	0,1012	0,06693	<b>0,06692</b>	0,05574	<b>0,010161</b>	0	0,00057	0	0,012
0,3256	0,2777	0,9062	1,5	20	0,93	0,5719	0,1531	0,07529	<b>0,07528</b>	0,05574	<b>0,01823</b>	0	0,00131	0	0,007
0,3256	0,2777	0,8935	2	20	0,9195	0,7264	0,207	0,08756	<b>0,08754</b>	0,05574	<b>0,02941</b>	0	0,002388	0	0,022
0,3256	0,3772	0,8328	1	20	0,9309	0,5584	0,14	0,07422	<b>0,07421</b>	0,05574	<b>0,01739</b>	0	0,00109	0	0,01
0,3256	0,3772	0,8207	1,5	20	0,9218	0,6901	0,2129	0,08479	<b>0,08482</b>	0,05574	<b>0,02655</b>	0	0,002526	0	0,025
0,3256	0,3772	0,8025	2	20	0,9084	0,8513	0,2899	0,10079	<b>0,1088</b>	0,05574	<b>0,0404</b>	0	0,004684	0	0,03
0,3256	0,4833	0,654	1	20	0,9116	0,8324	0,2119	0,09693	<b>0,09687</b>	0,05574	<b>0,03862</b>	0	0,002503	0	0,066
0,3256	0,4833	0,615	1,5	20	0,8926	1,022	0,3364	0,12026	<b>0,1202</b>	0,05574	<b>0,05817</b>	0	0,00631	0	0,032
0,3256	0,4833	–	–	20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,3127	0	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3127	0,2667	0,9115	1	15	0,9146	0,4415	0,1029	0,09338	<b>0,09325</b>	0,07735	<b>0,01508</b>	0	0,00082	0	0,139
0,3127	0,2667	0,8987	1,5	15	0,9094	0,5828	0,1564	0,1057	<b>0,1055</b>	0,07735	<b>0,02627</b>	0	0,001893	0	0,182
0,3127	0,2667	0,88	2	15	0,8895	0,746	0,2127	0,1243	<b>0,1239</b>	0,07735	<b>0,04305</b>	0	0,0035	0	0,264
0,3127	0,3623	0,8275	1	15	0,9059	0,5656	0,1428	0,10387	<b>0,1037</b>	0,07735	<b>0,02475</b>	0	0,001578	0	0,187
0,3127	0,3623	0,8095	1,5	15	0,8929	0,7063	0,2187	0,1199	<b>0,1196</b>	0,07735	<b>0,03859</b>	0	0,0037	0	0,215
0,3127	0,3623	0,7821	2	15	0,8733	0,8832	0,301	0,1451	<b>0,1447</b>	0,07735	<b>0,06033</b>	0	0,007	0	0,285
0,3127	0,4641	0,6385	1	15	0,8785	0,8566	0,2187	0,1383	<b>0,1378</b>	0,07735	<b>0,05676</b>	0	0,0037	0	0,366
0,3127	0,4641	0,55	1,5	15	0,8391	1,151	0,3747	0,1918	<b>0,1907</b>	0,07735	<b>0,1025</b>	0	0,01086	0	0,584
0,3127	0,4641	–	–	15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,2857	0	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	0	0	0	0
0,2857	0,2437	0,903	1	10	0,8657	0,4539	0,1069	0,15509	<b>0,1546</b>	0,127	<b>0,02616</b>	0	0,001453	0	0,296
0,2857	0,2437	0,8795	1,5	10	0,8485	0,6092	0,1643	0,1785	<b>0,1776</b>	0,127	<b>0,04714</b>	0	0,003428	0	0,535
0,2857	0,2437	0,8435	2	10	0,8222	0,7967	0,2275	0,21625	<b>0,2142</b>	0,127	<b>0,08062</b>	0	0,006572	0	0,944
0,2857	0,331	0,8143	1	10	0,8519	0,5831	0,1497	0,1739	<b>0,173</b>	0,127	<b>0,04319</b>	0	0,002846	0	0,497
0,2857	0,331	0,7795	1,5	10	0,8287	0,7484	0,2334	0,2067	<b>0,2051</b>	0,127	<b>0,07113</b>	0	0,006917	0	0,803
0,2857	0,331	0,7185	2	10	0,789	0,9815	0,3341	0,26746	<b>0,2636</b>	0,127	<b>0,1224</b>	0	0,01418	0	1,458
0,2857	0,4241	0,575	1	10	0,7965	0,9609	0,2442	0,2555	<b>0,2519</b>	0,127	<b>0,1173</b>	0	0,007571	0	1,435
0,2857	0,4241	–	–	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,2857	0,4241	–	–	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблиця Б.7 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 2 + режим 3 при  $R_n = \infty$ 

$R_{load},$ ОМ	$k_b$	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_{\eta}^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}, \%$
											r	q			
0,3256	1	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3256	1,3	1,0953	1	20	0,9402	0,2973	0,2303	0,06366	<b>0,06363</b>	0,05574	<b>0,004927</b>	0	0,002958	0	0,0477
0,3256	1,3	1,0885	1,5	20	0,9345	0,4263	0,2719	0,07005	<b>0,07</b>	0,05574	<b>0,01013</b>	0	0,004121	0	0,075
0,3256	1,3	1,0786	2	20	0,9266	0,5655	0,3166	0,07927	<b>0,07916</b>	0,05574	<b>0,01735</b>	0	0,005589	0	0,135
0,3256	1,35	1,1671	1	20	0,9382	0,302	0,2981	0,06582	<b>0,06578</b>	0,05574	<b>0,005084</b>	0	0,004955	0	0,06
0,3256	1,35	1,1595	1,5	20	0,9324	0,4185	0,3511	0,07245	<b>0,07238</b>	0,05574	<b>0,009762</b>	0	0,006872	0	0,099
0,3256	1,35	1,1486	2	20	0,9242	0,5499	0,4081	0,08202	<b>0,08188</b>	0,05574	<b>0,01686</b>	0	0,009283	0	0,163
0,3256	1,4	1,3496	1	20	0,9335	0,3195	0,4198	0,07129	<b>0,07122</b>	0,05574	<b>0,00569</b>	0	0,009782	0	0,102
0,3256	1,4	1,3395	1,5	20	0,9269	0,4118	0,4339	0,07892	<b>0,0788</b>	0,05574	<b>0,009453</b>	0	0,0136	0	0,155
0,3256	1,4	1,325	2	20	0,9174	0,5292	0,5748	0,08998	<b>0,08977</b>	0,05574	<b>0,01561</b>	0	0,01842	0	0,235
0,3127	1	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3127	1,3	1,0906	1	15	0,9187	0,2989	0,2309	0,08852	<b>0,08839</b>	0,07735	<b>0,006912</b>	0	0,004123	0	0,148
0,3127	1,3	1,0808	1,5	15	0,9111	0,4296	0,2729	0,09761	<b>0,09739</b>	0,07735	<b>0,01428</b>	0	0,00576	0	0,224
0,3127	1,3	1,0668	2	15	0,9002	0,5717	0,3185	0,1109	<b>0,1105</b>	0,07735	<b>0,02528</b>	0	0,007848	0	0,335
0,3127	1,35	1,16	1	15	0,9161	0,3043	0,2992	0,09162	<b>0,09144</b>	0,07735	<b>0,007164</b>	0	0,006923	0	0,193
0,3127	1,35	1,1494	1,5	15	0,9082	0,4228	0,3528	0,1011	<b>0,1008</b>	0,07735	<b>0,01383</b>	0	0,00963	0	0,254
0,3127	1,35	1,134	2	15	0,897	0,5575	0,4111	0,1149	<b>0,1145</b>	0,07735	<b>0,02404</b>	0	0,01307	0	0,363
0,3127	1,4	1,3363	1	15	0,9066	0,3233	0,4217	0,09944	<b>0,09919</b>	0,07735	<b>0,008084</b>	0	0,01376	0	0,246
0,3127	1,4	1,3218	1,5	15	0,9005	0,4184	0,4981	0,1105	<b>0,1101</b>	0,07735	<b>0,01354</b>	0	0,01919	0	0,348
0,3127	1,4	1,301	2	15	0,8876	0,54	0,5814	0,1267	<b>0,1261</b>	0,07735	<b>0,02255</b>	0	0,02615	0	0,492
0,2857	1	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	0	0	0	0
0,2857	1,3	1,0803	1	10	0,8728	0,3023	0,2319	0,1458	<b>0,1455</b>	0,127	<b>0,01161</b>	0	0,00683	0	0,23
0,2857	1,3	1,0637	1,5	10	0,8609	0,4366	0,2748	0,1615	<b>0,1608</b>	0,127	<b>0,02421</b>	0	0,009594	0	0,432
0,2857	1,3	1,0395	2	10	0,8438	0,5849	0,3224	0,1851	<b>0,1837</b>	0,127	<b>0,04345</b>	0	0,0132	0	0,751
0,2857	1,35	1,145	1	10	0,8687	0,3039	0,3012	0,1511	<b>0,1507</b>	0,127	<b>0,01215</b>	0	0,01153	0	0,297
0,2857	1,35	1,1265	1,5	10	0,8564	0,4322	0,3563	0,1677	<b>0,1669</b>	0,127	<b>0,02373</b>	0	0,01613	0	0,509
0,2857	1,35	1,0993	2	10	0,8385	0,5742	0,4174	0,1927	<b>0,191</b>	0,127	<b>0,04187</b>	0	0,02213	0	0,861
0,2857	1,4	1,3063	1	10	0,8584	0,3315	0,4275	0,165	<b>0,1642</b>	0,127	<b>0,01369</b>	0	0,02321	0	0,479
0,2857	1,4	1,2811	1,5	10	0,844	0,4329	0,5069	0,1848	<b>0,1835</b>	0,127	<b>0,0238</b>	0	0,03264	0	0,743
0,2857	1,4	1,244	2	10	0,823	0,5646	0,5959	0,2151	<b>0,2126</b>	0,127	<b>0,04048</b>	0	0,04511	0	1,164

Таблиця Б.8 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 1 при  $R_n = 0$ 

$R_{load},$ Ом	$L, \text{ мГн}$	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}, \%$
											r	q			
0,3256	0	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3256	0,2777	0,922	0	20	0,943	0,2906	0	0,06046	<b>0,06045</b>	0,05574	<b>0,004708</b>	0	0	0	0,016
0,3256	0,3772	0,842	0	20	0,9379	0,4322	0	0,0662	<b>0,06616</b>	0,05574	<b>0,01041</b>	0	0	0	0,06
0,3256	0,4833	0,6775	0	20	0,924	0,6883	0	0,08228	<b>0,08215</b>	0,05574	<b>0,02641</b>	0	0	0	0,158
0,3127	0	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3127	0,2667	0,9215	0	15	0,9225	0,2908	0	0,08398	<b>0,08393</b>	0,07734	<b>0,006543</b>	0	0	0	0,059
0,3127	0,3623	0,8413	0	15	0,9158	0,4327	0	0,09199	<b>0,09188</b>	0,07735	<b>0,01449</b>	0	0	0	0,119
0,3127	0,4641	0,6748	0	15	0,8971	0,691	0	0,1147	<b>0,1143</b>	0,07735	<b>0,03695</b>	0	0	0	0,349
0,2857	0	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	0	0	0	0
0,2857	0,2437	0,9211	0	10	0,8788	0,2909	0	0,1379	<b>0,1378</b>	0,127	<b>0,01075</b>	0	0	0	0,072
0,2857	0,331	0,839	0	10	0,8685	0,4338	0	0,1514	<b>0,1509</b>	0,127	<b>0,0239</b>	0	0	0	0,33
0,2857	0,4241	0,665	0	10	0,8396	0,7013	0	0,191	<b>0,1895</b>	0,127	<b>0,06246</b>	0	0	0	0,8

Таблиця Б.9 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 2 при  $R_n = 0$ 

$R_{load},$ Ом	$L, \text{ мГн}$	$k_l$	$k_b$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}, \%$
											r	q			
0,3256	0	1	1	20	0,947	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0
0,3256	0	1,1707	1,3	20	0,9403	0,3214	0,1857	0,06345	<b>0,06342</b>	0,05574	<b>0,001919</b>	<b>0,00384</b>	<b>0,001919</b>	0	0,048
0,3256	0	1,331	1,35	20	0,9334	0,4569	0,2638	0,07131	<b>0,07126</b>	0,05574	<b>0,003879</b>	<b>0,00776</b>	<b>0,003879</b>	0	0,066
0,3256	0	2,0465	1,4	20	0,9067	0,7941	0,4585	0,1029	<b>0,1026</b>	0,05574	<b>0,01172</b>	<b>0,02343</b>	<b>0,01172</b>	0	0,259
0,3127	0	1	1	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0
0,3127	0	1,1638	1,3	15	0,919	0,3216	0,1857	0,08816	<b>0,08802</b>	0,07734	<b>0,002667</b>	<b>0,00533</b>	<b>0,002667</b>	0	0,159
0,3127	0	1,315	1,35	15	0,9097	0,4582	0,2645	0,09925	<b>0,09901</b>	0,07735	<b>0,005414</b>	<b>0,01083</b>	<b>0,005414</b>	0	0,246
0,3127	0	1,9715	1,4	15	0,873	0,8074	0,4661	0,1454	<b>0,1446</b>	0,07735	<b>0,01681</b>	<b>0,03361</b>	<b>0,01681</b>	0	0,581
0,2857	0	1	1	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0
0,2857	0	1,15	1,3	10	0,8735	0,3218	0,1858	0,1448	<b>0,1446</b>	0,127	<b>0,004386</b>	<b>0,00877</b>	<b>0,004386</b>	0	0,179
0,2857	0	1,2815	1,35	10	0,8594	0,4604	0,2658	0,1636	<b>0,1629</b>	0,127	<b>0,008975</b>	<b>0,01795</b>	<b>0,008975</b>	0	0,448
0,2857	0	1,801	1,4	10	0,8008	0,8345	0,4818	0,2487	<b>0,245</b>	0,127	<b>0,02948</b>	<b>0,05898</b>	<b>0,02948</b>	0	1,523



Таблиця Б.10 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 3 при  $R_n = 0$ ,  $n = 2i - 1$ 

$R_{load},$ ОМ	$L, \text{ мГн}$	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}, \%$
											r	q			
0,3256	0	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0
0,3256	0	0,9876	1	20	0,936	0,473	0,04268	0,06836	<b>0,06832</b>	0,05574	<b>0,004921</b>	<b>0,007551</b>	<b>0,0001</b>	0	0,061
0,3256	0	0,9715	1,5	20	0,9217	0,72	0,06495	0,08501	<b>0,08487</b>	0,05574	<b>0,0114</b>	<b>0,01749</b>	<b>0,000235</b>	0	0,163
0,3256	0	0,9484	2	20	0,9008	0,9809	0,08853	0,1101	<b>0,1098</b>	0,05574	<b>0,02116</b>	<b>0,03247</b>	<b>0,000437</b>	0	0,286
0,3127	0	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07735</b>	0,07735	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0
0,3127	0	0,9824	1	15	0,9131	0,4748	0,04284	0,09513	<b>0,09494</b>	0,07734	<b>0,006882</b>	<b>0,01056</b>	<b>0,000189</b>	0	0,199
0,3127	0	0,9598	1,5	15	0,8937	0,7265	0,06555	0,119	<b>0,1185</b>	0,07735	<b>0,01611</b>	<b>0,04083</b>	<b>0,000332</b>	0	0,384
0,3127	0	0,9265	2	15	0,865	0,9981	0,09009	0,1561	<b>0,155</b>	0,07735	<b>0,03041</b>	<b>0,04666</b>	<b>0,000627</b>	0	0,669
0,2857	0	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0
0,2857	0	0,9711	1	10	0,8644	0,4785	0,04318	0,1569	<b>0,1563</b>	0,127	<b>0,01148</b>	<b>0,01761</b>	<b>0,00056</b>	0	0,359
0,2857	0	0,9324	1,5	10	0,834	0,7404	0,06680	0,199	<b>0,1972</b>	0,127	<b>0,02747</b>	<b>0,04215</b>	<b>0,000567</b>	0	0,908
0,2857	0	0,8737	2	10	0,7877	1,037	0,09355	0,2695	<b>0,2647</b>	0,127	<b>0,05388</b>	<b>0,08267</b>	<b>0,00111</b>	0	1,787

Таблиця Б.11 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 4 при  $R_n = 0$ 

$R_{load},$ ОМ	$k_{sb}$	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}, \%$
											r	q			
0,3256	1	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,3256	1,3	1	0	20	0,9472	0	0,28143	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,3256	1,35	1	0	20	0,9472	0	0,33588	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,3256	1,4	1	0	20	0,9472	0	0,39174	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,3127	1	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,3127	1,3	1	0	15	0,9282	0	0,28143	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,3127	1,35	1	0	15	0,9282	0	0,33588	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,3127	1,4	1	0	15	0,9282	0	0,39174	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,2857	1	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,2857	1,3	1	0	10	0,8873	0	0,28143	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,2857	1,35	1	0	10	0,8873	0	0,33588	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0
0,2857	1,4	1	0	10	0,8873	0	0,39174	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	<b>0</b>	–	0	0

Таблиця Б.12 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 1 + режим 2 при  $R_n = 0$ 

$R_{load}$ , Ом	$L$ , мГн	$k_l$	$k_b$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}$ , %
											r	q			
0,3256	0	1	1	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3256	0,2777	1,0423	1,3	20	0,9348	0,4676	0,1778	0,06974	<b>0,06969</b>	0,05574	<b>0,00803</b>	0,00416	0,001762	0	0,063
0,3256	0,2777	1,1359	1,35	20	0,9261	0,605	0,2538	0,07983	<b>0,07974</b>	0,05574	<b>0,0118</b>	0,008603	0,00359	0	0,122
0,3256	0,2777	1,3165	1,4	20	0,8806	1,093	0,467	0,13554	<b>0,1349</b>	0,05574	<b>0,03629</b>	0,03028	0,01263	0	0,445
0,3256	0,3772	0,911	1,3	20	0,9277	0,6045	0,1737	0,07789	<b>0,0778</b>	0,05574	<b>0,0161</b>	0,004271	0,001683	0	0,12
0,3256	0,3772	0,9349	1,35	20	0,9161	0,7604	0,2466	0,09154	<b>0,09136</b>	0,05574	<b>0,02331</b>	0,008921	0,003391	0	0,2
0,3256	0,3772	–	1,4	20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,3256	0,4833	0,548	1,3	20	0,8979	1,004	0,1642	0,11373	<b>0,1134</b>	0,05574	<b>0,05192</b>	0,004224	0,001503	0	0,302
0,3256	0,4833	–	1,35	20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,3256	0,4833	–	1,4	20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,3127	0	1	1	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3127	0,2667	1,0364	1,3	15	0,9116	0,4678	0,178	0,09693	<b>0,09673</b>	0,07735	<b>0,01116</b>	0,005761	0,002452	0	0,209
0,3127	0,2667	1,1233	1,35	15	0,9	0,6057	0,2543	0,11109	<b>0,1107</b>	0,07735	<b>0,01644</b>	0,01193	0,005	0	0,32
0,3127	0,2667	1,259	1,4	15	0,8397	1,103	0,4785	0,19094	<b>0,1891</b>	0,07735	<b>0,05152</b>	0,04253	0,01771	0	0,955
0,3127	0,3623	0,9056	1,3	15	0,9022	0,6053	0,174	0,10837	<b>0,108</b>	0,07735	<b>0,02244</b>	0,0059	0,002343	0	0,313
0,3127	0,3623	0,925	1,35	15	0,8869	0,7617	0,247	0,12753	<b>0,1269</b>	0,07735	<b>0,03255</b>	0,01232	0,004721	0	0,457
0,3127	0,3623	–	1,4	15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,3127	0,4641	0,555	1,3	15	0,8583	1,045	0,1643	0,16512	<b>0,1639</b>	0,07735	<b>0,07865</b>	0,005805	0,002087	0	0,746
0,3127	0,4641	–	1,35	15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,3127	0,4641	–	1,4	15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,2857	0	1	1	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	0	0	0	0
0,2857	0,2437	1,0235	1,3	10	0,8624	0,4681	0,1784	0,1595	<b>0,1589</b>	0,127	<b>0,01843</b>	0,0094	0,004044	0	0,396
0,2857	0,2437	1,095	1,35	10	0,845	0,6071	0,2551	0,18337	<b>0,1821</b>	0,127	<b>0,02727</b>	0,01954	0,008263	0	0,699
0,2857	0,2437	1,1325	1,4	10	0,7555	1,12	0,4805	0,3236	<b>0,3156</b>	0,127	<b>0,08854</b>	0,07068	0,02933	0	2,493
0,2857	0,331	0,893	1,3	10	0,8483	0,6072	0,1746	0,17888	<b>0,1777</b>	0,127	<b>0,03724</b>	0,009584	0,003871	0	0,655
0,2857	0,331	0,9005	1,35	10	0,8255	0,7651	0,2475	0,21136	<b>0,2091</b>	0,127	<b>0,05437</b>	0,01997	0,00778	0	1,054
0,2857	0,331	–	1,4	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,2857	0,4241	–	1,3	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,2857	0,4241	–	1,35	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,2857	0,4241	–	1,4	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблиця Б.13 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 1 + режим 3 при  $R_n = 0$ 

$R_{load}$ , ОМ	$L$ , мГн	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}$ , %
											r	q			
0,3256	0	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3256	0,2777	0,9876	1	20	0,936	0,4668	0,09018	0,06836	<b>0,06834</b>	0,05574	<b>0,004593</b>	0,007551	0,00045	0	0,027
0,3256	0,2777	0,9716	1,5	20	0,9217	0,7104	0,1373	0,085	<b>0,08493</b>	0,05574	<b>0,01064</b>	0,01749	0,00105	0	0,086
0,3256	0,2777	0,9483	2	20	0,9008	0,9679	0,187	0,11013	<b>0,1099</b>	0,05574	<b>0,01975</b>	0,03247	0,00195	0	0,201
0,3256	0,3772	0,9876	1	20	0,936	0,462	0,1133	0,06836	<b>0,06836</b>	0,05574	<b>0,00435</b>	0,007551	0,00072	0	0
0,3256	0,3772	0,9716	1,5	20	0,9217	0,7033	0,1725	0,085	<b>0,08497</b>	0,05574	<b>0,01007</b>	0,01749	0,00166	0	0,038
0,3256	0,3772	0,9483	2	20	0,9008	0,9581	0,235	0,11013	<b>0,11</b>	0,05574	<b>0,0187</b>	0,03247	0,003077	0	0,132
0,3256	0,4833	0,9876	1	20	0,936	0,4561	0,1365	0,06836	<b>0,06838</b>	0,05574	<b>0,00405</b>	0,007551	0,00104	0	0,031
0,3256	0,4833	0,9716	1,5	20	0,9217	0,6943	0,2078	0,085	<b>0,08502</b>	0,05574	<b>0,00938</b>	0,01749	0,00241	0	0,021
0,3256	0,4833	0,9483	2	20	0,9008	0,9459	0,2831	0,11013	<b>0,1101</b>	0,05574	<b>0,0174</b>	0,03247	0,00447	0	0,046
0,3127	0	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3127	0,2667	0,9823	1	15	0,9131	0,4686	0,09053	0,09513	<b>0,09497</b>	0,07735	<b>0,00642</b>	0,01056	0,00063	0	0,174
0,3127	0,2667	0,9597	1,5	15	0,8937	0,7169	0,1385	0,11898	<b>0,1186</b>	0,07735	<b>0,01504</b>	0,02472	0,001484	0	0,328
0,3127	0,2667	0,9265	2	15	0,865	0,9849	0,1903	0,1561	<b>0,1552</b>	0,07735	<b>0,02838</b>	0,04666	0,0028	0	0,575
0,3127	0,3623	0,9823	1	15	0,9131	0,4638	0,1137	0,09513	<b>0,095</b>	0,07735	<b>0,00061</b>	0,01056	0,001	0	0,148
0,3127	0,3623	0,9597	1,5	15	0,8937	0,7097	0,174	0,11898	<b>0,1187</b>	0,07735	<b>0,01424</b>	0,02472	0,002343	0	0,279
0,3127	0,3623	0,9265	2	15	0,865	0,957	0,2391	0,1561	<b>0,1553</b>	0,07735	<b>0,02687</b>	0,04666	0,004422	0	0,505
0,3127	0,4641	0,9823	1	15	0,9131	0,4579	0,137	0,09513	<b>0,09503</b>	0,07735	<b>0,00566</b>	0,01056	0,001453	0	0,115
0,3127	0,4641	0,9597	1,5	15	0,8937	0,7006	0,2097	0,11898	<b>0,1187</b>	0,07735	<b>0,01325</b>	0,02472	0,0034	0	0,219
0,3127	0,4641	0,9265	2	15	0,865	0,9625	0,2881	0,1561	<b>0,1554</b>	0,07735	<b>0,02501</b>	0,04666	0,00642	0	0,418
0,2857	0	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	0	0	0	0
0,2857	0,2437	0,971	1	10	0,8644	0,4722	0,09123	0,1569	<b>0,1564</b>	0,127	<b>0,01071</b>	0,01761	0,001057	0	0,333
0,2857	0,2437	0,9325	1,5	10	0,834	0,7306	0,1412	0,19899	<b>0,1973</b>	0,127	<b>0,02564</b>	0,04215	0,002531	0	0,832
0,2857	0,2437	0,8735	2	10	0,7877	1,023	0,1977	0,26955	<b>0,2649</b>	0,127	<b>0,05029</b>	0,08267	0,00496	0	1,711
0,2857	0,331	0,971	1	10	0,8644	0,4674	0,1146	0,1569	<b>0,1564</b>	0,127	<b>0,01014</b>	0,01761	0,00167	0	0,307
0,2857	0,331	0,9325	1,5	10	0,834	0,7232	0,1774	0,19899	<b>0,1974</b>	0,127	<b>0,02428</b>	0,04215	0,00399	0	0,782
0,2857	0,331	0,8735	2	10	0,7877	1,013	0,2484	0,26955	<b>0,2651</b>	0,127	<b>0,04761</b>	0,08267	0,00784	0	1,639
0,2857	0,4241	0,971	1	10	0,8644	0,4615	0,1381	0,1569	<b>0,1565</b>	0,127	<b>0,00944</b>	0,01761	0,002423	0	0,274
0,2857	0,4241	0,9325	1,5	10	0,834	0,714	0,2137	0,19899	<b>0,1976</b>	0,127	<b>0,02259</b>	0,04215	0,0058	0	0,721
0,2857	0,4241	0,8735	2	10	0,7877	0,9999	0,2993	0,26955	<b>0,2654</b>	0,127	<b>0,04431</b>	0,08267	0,01137	0	1,55

Таблиця Б.14 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 2 + режим 3 при  $R_n = 0$ 

$R_{load},$ ОМ	$k_b$	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}, \%$
											r	q			
0,3256	1	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3256	1,3	1,1599	1	20	0,9321	0,5181	0,1942	0,07287	<b>0,07281</b>	0,05574	<b>0,005502</b>	0,009464	0,002102	0	0,087
0,3256	1,3	1,1459	1,5	20	0,9215	0,6958	0,2024	0,08525	<b>0,08502</b>	0,05574	<b>0,01021</b>	0,01677	0,002283	0	0,158
0,3256	1,3	1,1258	2	20	0,9064	0,8963	0,2133	0,1033	<b>0,1031</b>	0,05574	<b>0,0127</b>	0,02758	0,002537	0	0,257
0,3256	1,35	1,3152	1	20	0,9272	0,5777	0,2696	0,07849	<b>0,0784</b>	0,05574	<b>0,006556</b>	0,01205	0,004052	0	0,119
0,3256	1,35	1,3127	1,5	20	0,9191	0,7075	0,2764	0,08806	<b>0,08791</b>	0,05574	<b>0,01018</b>	0,01773	0,004259	0	0,173
0,3256	1,35	1,2946	2	20	0,9074	0,863	0,2853	0,1021	<b>0,1018</b>	0,05574	<b>0,01549</b>	0,02603	0,004539	0	0,266
0,3256	1,4	2,0397	1	20	0,9039	0,828	0,4648	0,1066	<b>0,106</b>	0,05574	<b>0,01277</b>	0,02544	0,01204	0	0,271
0,3256	1,4	2,0307	1,5	20	0,9004	0,8708	0,4695	0,1106	<b>0,1103</b>	0,05574	<b>0,01429</b>	0,02798	0,01239	0	0,304
0,3256	1,4	2,0183	2	20	0,8954	0,929	0,4751	0,1168	<b>0,1164</b>	0,05574	<b>0,0165</b>	0,03161	0,01258	0	0,337
0,3127	1	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3127	1,3	1,1484	1	15	0,9077	0,522	0,196	0,1017	<b>0,1014</b>	0,07735	<b>0,007736</b>	0,01334	0,002972	0	0,251
0,3127	1,3	1,1285	1,5	15	0,8932	0,7049	0,2057	0,1195	<b>0,1191</b>	0,07735	<b>0,01453</b>	0,02391	0,003273	0	0,383
0,3127	1,3	1,0993	2	15	0,8721	0,9146	0,2188	0,1466	<b>0,1458</b>	0,07735	<b>0,02482</b>	0,03989	0,003705	0	0,598
0,3127	1,35	1,3008	1	15	0,9008	0,5865	0,2746	0,1102	<b>0,1098</b>	0,07735	<b>0,009343</b>	0,01726	0,005834	0	0,323
0,3127	1,35	1,2827	1,5	15	0,8893	0,7219	0,2833	0,1244	<b>0,1239</b>	0,07735	<b>0,01466</b>	0,02566	0,006206	0	0,434
0,3127	1,35	1,2565	2	15	0,8728	0,8864	0,2947	0,1457	<b>0,1449</b>	0,07735	<b>0,02262</b>	0,03816	0,006719	0	0,593
0,3127	1,4	1,9608	1	15	0,8689	0,844	0,4751	0,1509	<b>0,1499</b>	0,07735	<b>0,01835</b>	0,03675	0,01746	0	0,625
0,3127	1,4	1,9474	1,5	15	0,8637	0,8911	0,4816	0,1578	<b>0,1567</b>	0,07735	<b>0,02067</b>	0,04075	0,01794	0	0,676
0,3127	1,4	1,9281	2	15	0,8568	0,9556	0,4898	0,1678	<b>0,1666</b>	0,07735	<b>0,02412</b>	0,04653	0,01856	0	0,757
0,2857	1	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	0	0	0	0
0,2857	1,3	1,1227	1	10	0,8557	0,5303	0,1999	0,1687	<b>0,1678</b>	0,127	<b>0,01306</b>	0,02265	0,005078	0	0,52
0,2857	1,3	1,0876	1,5	10	0,8328	0,725	0,2131	0,2014	<b>0,1995</b>	0,127	<b>0,02516</b>	0,0416	0,005769	0	0,933
0,2857	1,3	1,0347	2	10	0,7973	0,9572	0,2317	0,2543	<b>0,2502</b>	0,127	<b>0,04453</b>	0,07183	0,006821	0	1,609
0,2857	1,35	1,2559	1	10	0,8448	0,5978	0,2808	0,1837	<b>0,1824</b>	0,127	<b>0,01586</b>	0,02953	0,01001	0	0,726
0,2857	1,35	1,223	1,5	10	0,8258	0,7462	0,2938	0,211	<b>0,2087</b>	0,127	<b>0,0256</b>	0,04513	0,01096	0	1,068
0,2857	1,35	1,174	2	10	0,7975	0,9326	0,3117	0,2539	<b>0,2498</b>	0,127	<b>0,04094</b>	0,06951	0,01234	0	1,609
0,2857	1,4	1,779	1	10	0,793	0,8787	0,4978	0,261	<b>0,2565</b>	0,127	<b>0,03237</b>	0,06569	0,03147	0	1,691
0,2857	1,4	1,7511	1,5	10	0,7831	0,9373	0,5099	0,277	<b>0,2718</b>	0,127	<b>0,03722</b>	0,0745	0,03302	0	1,89
0,2857	1,4	1,71	2	10	0,7685	1,021	0,5256	0,3012	<b>0,2946</b>	0,127	<b>0,04477</b>	0,0877	0,03509	0	2,208

Таблиця Б.15 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 1 при  $R_n = R_s$ 

$R_{load}$ , Ом	$L$ , мГн	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}$ , %
											r	q			
0,3256	0	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3256	0,2777	0,922	0	20	0,943	0,2906	0	0,06046	<b>0,06045</b>	0,05574	<b>0,004708</b>	0	0	0	0,016
0,3256	0,3772	0,842	0	20	0,9379	0,4322	0	0,0662	<b>0,06616</b>	0,05574	<b>0,01041</b>	0	0	0	0,06
0,3256	0,4833	0,6775	0	20	0,924	0,6883	0	0,08228	<b>0,08215</b>	0,05574	<b>0,02641</b>	0	0	0	0,158
0,3127	0	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	0	0	0	0
0,3127	0,2667	0,9215	0	15	0,9225	0,2908	0	0,08398	<b>0,08393</b>	0,07734	<b>0,006543</b>	0	0	0	0,059
0,3127	0,3623	0,8413	0	15	0,9158	0,4327	0	0,09199	<b>0,09188</b>	0,07735	<b>0,01449</b>	0	0	0	0,119
0,3127	0,4641	0,6748	0	15	0,8971	0,691	0	0,1147	<b>0,1143</b>	0,07735	<b>0,03695</b>	0	0	0	0,349
0,2857	0	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	0	0	0	0
0,2857	0,2437	0,9211	0	10	0,8788	0,2909	0	0,1379	<b>0,1378</b>	0,127	<b>0,01075</b>	0	0	0	0,072
0,2857	0,331	0,839	0	10	0,8685	0,4338	0	0,1514	<b>0,1509</b>	0,127	<b>0,0239</b>	0	0	0	0,33
0,2857	0,4241	0,665	0	10	0,8396	0,7013	0	0,191	<b>0,1895</b>	0,127	<b>0,06246</b>	0	0	0	0,8

Таблиця Б.16 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 2 при  $R_n = R_s$ 

$R_{load}$ , Ом	$k_b$	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}$ , %
											r	q			
0,3256	1	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	–
0,3256	1,3	1,1513	0	20	0,9335	0,2935	0,18335	0,07126	<b>0,07126</b>	0,05574	<b>0,001873</b>	<b>0,002928</b>	<b>0,001873</b>	<b>0,00884</b>	–
0,3256	1,35	1,285	0	20	0,9194	0,42	0,26007	0,08771	<b>0,08771</b>	0,05574	<b>0,00377</b>	<b>0,006065</b>	<b>0,00377</b>	<b>0,01836</b>	–
0,3256	1,4	1,8175	0	20	0,8604	0,7618	0,46209	0,1623	<b>0,1623</b>	0,05574	<b>0,0119</b>	<b>0,02045</b>	<b>0,0119</b>	<b>0,0623</b>	–
0,3127	1	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	–
0,3127	1,3	1,14	0	15	0,9111	0,2849	0,18265	0,09752	<b>0,09752</b>	0,07734	<b>0,00258</b>	<b>0,0037</b>	<b>0,00258</b>	<b>0,01131</b>	–
0,3127	1,35	1,259	0	15	0,8936	0,3882	0,25908	0,199	<b>0,119</b>	0,07735	<b>0,005191</b>	<b>0,007709</b>	<b>0,005191</b>	<b>0,0236</b>	–
0,3127	1,4	1,689	0	15	0,8187	0,7522	0,46612	0,2214	<b>0,2214</b>	0,07735	<b>0,01681</b>	<b>0,02696</b>	<b>0,01681</b>	<b>0,08346</b>	–
0,2857	1	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	–
0,2857	1,3	1,119	0	10	0,8651	0,2686	0,18109	0,1559	<b>0,1559</b>	0,127	<b>0,004167</b>	<b>0,004997</b>	<b>0,004167</b>	<b>0,01558</b>	–
0,2857	1,35	1,212	0	10	0,8426	0,3844	0,25626	0,1868	<b>0,1868</b>	0,127	<b>0,008342</b>	<b>0,010428</b>	<b>0,008342</b>	<b>0,03269</b>	–
0,2857	1,4	1,4675	0	10	0,7463	0,7135	0,46471	0,34	<b>0,34</b>	0,127	<b>0,02743</b>	<b>0,03723</b>	<b>0,02743</b>	<b>0,1209</b>	–

Таблиця Б.17 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 3 при  $R_n = R_s$ ,  $n = 2i - 1$ 

$R_{load}$ , ОМ	$L$ , мГн	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}$ , %
											r	q			
0,3256	0	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	–
0,3256	0	0,9725	1	20	0,9225	0,4402	0,043268	0,084	<b>0,084</b>	0,05574	<b>0,005058</b>	<b>0,005742</b>	<b>0,000104</b>	<b>0,01735</b>	–
0,3256	0	0,9365	1,5	20	0,8902	0,6809	0,067112	0,1233	<b>0,1233</b>	0,05574	<b>0,01217</b>	<b>0,01368</b>	<b>0,000251</b>	<b>0,04149</b>	–
0,3256	0	0,8825	2	20	0,8418	0,9527	0,094328	0,1879	<b>0,1879</b>	0,05574	<b>0,02403</b>	<b>0,02656</b>	<b>0,000496</b>	<b>0,08107</b>	–
0,3127	0	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	–
0,3127	0	0,9644	1	15	0,8976	0,4313	0,043522	0,1141	<b>0,1141</b>	0,07734	<b>0,007103</b>	<b>0,007289</b>	<b>0,000146</b>	<b>0,02225</b>	–
0,3127	0	0,9175	1,5	15	0,8573	0,672	0,068109	0,1665	<b>0,1665</b>	0,07735	<b>0,01739</b>	<b>0,01754</b>	<b>0,000358</b>	<b>0,05388</b>	–
0,3127	0	0,8469	2	15	0,7963	0,9514	0,097086	0,2558	<b>0,2558</b>	0,07735	<b>0,03536</b>	<b>0,03466</b>	<b>0,000729</b>	<b>0,1076</b>	–
0,2857	0	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	–
0,2857	0	0,9495	1	10	0,8474	0,4145	0,043925	0,1801	<b>0,1801</b>	0,127	<b>0,01188</b>	<b>0,009942</b>	<b>0,000245</b>	<b>0,03101</b>	–
0,2857	0	0,8825	1,5	10	0,7947	0,652	0,069636	0,2583	<b>0,2583</b>	0,127	<b>0,02985</b>	<b>0,02414</b>	<b>0,000616</b>	<b>0,0767</b>	–
0,2857	0	0,781	2	10	0,7148	0,9384	0,101541	0,3989	<b>0,3989</b>	0,127	<b>0,0635</b>	<b>0,04834</b>	<b>0,00131</b>	<b>0,1588</b>	–

Таблиця Б.18 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 4 при  $R_n = R_s$ 

$R_{load}$ , ОМ	$k_{sb}$	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_n^*$	$\delta_{\Delta P\Sigma}$ , %
											r	q			
0,3256	1	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	<b>0</b>	–	<b>0</b>	–
0,3256	1,3	0,9867	0	20	0,941	0,03	0,287	0,06243	0,06243	0,05574	<b>0</b>	<b>0,00005</b>	–	<b>0,006637</b>	–
0,3256	1,35	0,9789	0	20	0,9377	0,0368	0,364	0,06641	0,06641	0,05574	<b>0</b>	<b>0,000076</b>	–	<b>0,01059</b>	–
0,3256	1,4	0,9635	0	20	0,9308	0,04583	0,4338	0,07433	0,07433	0,05574	<b>0</b>	<b>0,000117</b>	–	<b>0,01847</b>	–
0,3127	1	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	0,07739	0,07739	<b>0</b>	<b>0</b>	–	<b>0</b>	–
0,3127	1,3	0,982	0	15	0,9205	0,04	0,3101	0,08634	0,08634	0,07739	<b>0</b>	<b>0,000124</b>	–	<b>0,008858</b>	–
0,3127	1,35	0,9717	0	15	0,916	0,04927	0,3745	0,09168	0,09168	0,07739	<b>0</b>	<b>0,000188</b>	–	<b>0,01414</b>	–
0,3127	1,4	0,9514	0	15	0,9071	0,06175	0,4493	0,1024	0,1024	0,07739	<b>0</b>	<b>0,000295</b>	–	<b>0,02476</b>	–
0,2857	1	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	0,127	0,127	<b>0</b>	<b>0</b>	–	<b>0</b>	–
0,2857	1,3	0,973	0	10	0,8766	0,06038	0,3275	0,127	0,1408	0,1408	<b>0</b>	<b>0,000463</b>	–	<b>0,01335</b>	–
0,2857	1,35	0,957	0	10	0,8701	0,0749	0,3981	0,127	0,1493	0,1493	<b>0</b>	<b>0,000713</b>	–	<b>0,02153</b>	–
0,2857	1,4	0,926	0	10	0,8573	0,09531	0,484	0,127	0,1665	0,1665	<b>0</b>	<b>0,001154</b>	–	<b>0,03829</b>	–



Таблиця Б.20 – Результати розрахування складових сумарної потужності втрат у режимі 1 + режим 3 при  $R_n = R_S$ 

$R_{load},$ ОМ	$L, \text{ мГн}$	$k_l$	$k_{garm}$	$P_{sc}/P_{usf}$	$\eta$	$Q_{rms}^*$	$P_{\Sigma RMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{min}^*$	$\Delta P_{q^*}$		$\Delta P_{puls}^*$	$\Delta P_{n^*}$	$\Delta P_{mut}^*$	$\delta_{\Delta P_{\Sigma}}, \%$
											r	q				
0,3256	0	1	0	20	0,9472	0	0	0,05574	<b>0,05574</b>	0,05574	<b>0</b>	0	0	0	0	0
0,3256	0,2777	0,9725	1	20	0,9225	0,4331	0,09142	0,08399	<b>0,08461</b>	0,05574	<b>0,00472</b>	0,00574	0,000466	0,01545	0,00249	0,729
0,3256	0,2777	0,9365	1,5	20	0,8902	0,6701	0,1418	0,12332	<b>0,1246</b>	0,05574	<b>0,0114</b>	0,01367	0,001121	0,0368	0,005931	1,06
0,3256	0,2777	0,8825	2	20	0,8418	0,9378	0,1993	0,1879	<b>0,19</b>	0,05574	<b>0,02243</b>	0,0266	0,002214	0,0715	0,01152	1,105
0,3256	0,3772	0,9725	1	20	0,9472	0,4279	0,1149	0,08399	<b>0,08463</b>	0,05574	<b>0,00447</b>	0,00574	0,000735	0,01545	0,00249	0,75
0,3256	0,3772	0,9365	1,5	20	0,8902	0,6619	0,1782	0,12332	<b>0,1247</b>	0,05574	<b>0,01075</b>	0,01367	0,00177	0,0368	0,005931	1,096
0,3256	0,3772	0,8825	2	20	0,8418	0,9263	0,2504	0,1879	<b>0,1901</b>	0,05574	<b>0,02124</b>	0,0266	0,00349	0,0715	0,01152	1,151
0,3256	0,4833	0,9725	1	20	0,9225	0,4214	0,1384	0,08399	<b>0,08465</b>	0,05574	<b>0,00416</b>	0,00574	0,001068	0,01545	0,00249	0,777
0,3256	0,4833	0,9365	1,5	20	0,8902	0,6517	0,2147	0,12332	<b>0,1247</b>	0,05574	<b>0,01001</b>	0,01367	0,002569	0,0368	0,005931	1,14
0,3256	0,4833	0,8825	2	20	0,8418	0,912	0,3017	0,1879	<b>0,1902</b>	0,05574	<b>0,00198</b>	0,0266	0,00507	0,0715	0,01152	1,208
0,3127	0	1	0	15	0,9282	0	0	0,07739	<b>0,07739</b>	0,07735	<b>0</b>	0	0	0	0	0
0,3127	0,2667	0,9644	1	15	0,8976	0,4242	0,0919	0,11414	<b>0,1141</b>	0,07735	<b>0,0063</b>	0,00729	0,00065	0,01885	0,00335	0,016
0,3127	0,2667	0,9175	1,5	15	0,8573	0,6605	0,1439	0,1665	<b>0,1661</b>	0,07735	<b>0,01623</b>	0,01752	0,001602	0,04536	0,008065	0,226
0,3127	0,2667	0,8468	2	15	0,7962	0,9359	0,2052	0,2558	<b>0,254</b>	0,07735	<b>0,03301</b>	0,03475	0,003258	0,08965	0,01594	0,737
0,3127	0,3623	0,9644	1	15	0,8976	0,4188	0,1156	0,11414	<b>0,1142</b>	0,07735	<b>0,00628</b>	0,00729	0,001033	0,01885	0,00335	0,007
0,3127	0,3623	0,9175	1,5	15	0,8573	0,652	0,1808	0,1665	<b>0,1662</b>	0,07735	<b>0,01536</b>	0,01752	0,002528	0,04536	0,008065	0,189
0,3127	0,3623	0,8468	2	15	0,7962	0,9237	0,2579	0,2558	<b>0,2541</b>	0,07735	<b>0,03126</b>	0,03475	0,005144	0,08965	0,01594	0,687
0,3127	0,4641	0,9644	1	15	0,8976	0,412	0,1392	0,11414	<b>0,1142</b>	0,07735	<b>0,00584</b>	0,00729	0,0015	0,01885	0,00335	0,034
0,3127	0,4641	0,9175	1,5	15	0,8573	0,6414	0,2178	0,1665	<b>0,1663</b>	0,07735	<b>0,143</b>	0,01752	0,00367	0,04536	0,008065	0,142
0,3127	0,4641	0,8468	2	15	0,7962	0,9084	0,3107	0,2558	<b>0,2542</b>	0,07735	<b>0,02909</b>	0,03475	0,007467	0,08965	0,01594	0,626
0,2857	0	1	0	10	0,8873	0	0	0,127	<b>0,127</b>	0,127	<b>0</b>	0	0	0	0	0
0,2857	0,2437	0,9495	1	10	0,8474	0,4069	0,09282	0,18009	<b>0,1776</b>	0,127	<b>0,01109</b>	0,00995	0,001094	0,02348	0,004957	1,396
0,2857	0,2437	0,8825	1,5	10	0,7947	0,64	0,1471	0,25833	<b>0,2508</b>	0,127	<b>0,02786</b>	0,02416	0,00275	0,05701	0,01204	2,904
0,2857	0,2437	0,781	2	10	0,7149	0,9201	0,2146	0,39888	<b>0,3787</b>	0,127	<b>0,05926</b>	0,04828	0,005848	0,1142	0,0241	5,069
0,2857	0,331	0,9495	1	10	0,8474	0,4012	0,1166	0,18009	<b>0,1776</b>	0,127	<b>0,0105</b>	0,00995	0,001727	0,02348	0,004957	1,372
0,2857	0,331	0,8825	1,5	10	0,7947	0,6308	0,1849	0,25833	<b>0,2509</b>	0,127	<b>0,02638</b>	0,02416	0,004341	0,05701	0,01204	2,862
0,2857	0,331	0,781	2	10	0,7149	0,9065	0,2696	0,39888	<b>0,3789</b>	0,127	<b>0,0561</b>	0,04828	0,009233	0,1142	0,0241	5,011
0,2857	0,4241	0,9495	1	10	0,8474	0,394	0,1405	0,18009	<b>0,1777</b>	0,127	<b>0,00977</b>	0,00995	0,002508	0,02348	0,004957	1,342
0,2857	0,4241	0,8825	1,5	10	0,7947	0,6193	0,2227	0,25833	<b>0,2511</b>	0,127	<b>0,02455</b>	0,02416	0,006302	0,05701	0,01204	2,811
0,2857	0,4241	0,781	2	10	0,7149	0,8895	0,3248	0,39888	<b>0,3792</b>	0,127	<b>0,05221</b>	0,04828	0,0134	0,1142	0,0241	4,941



*Наукове видання*

**ЖЕМЕРОВ** Георгій Георгійович,  
**ТУГАЙ** Дмитро Васильович

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

МОНОГРАФІЯ

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

Редактор *О. А. Норик*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

Дизайн обкладинки *Т. А. Лазуренко, А. А. Сабельніков*

Підп. до друку 22.01.2018. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 10,2.

Тираж 300 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.  
Електронна адреса: [rektorat@kname.edu.ua](mailto:rektorat@kname.edu.ua).

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.